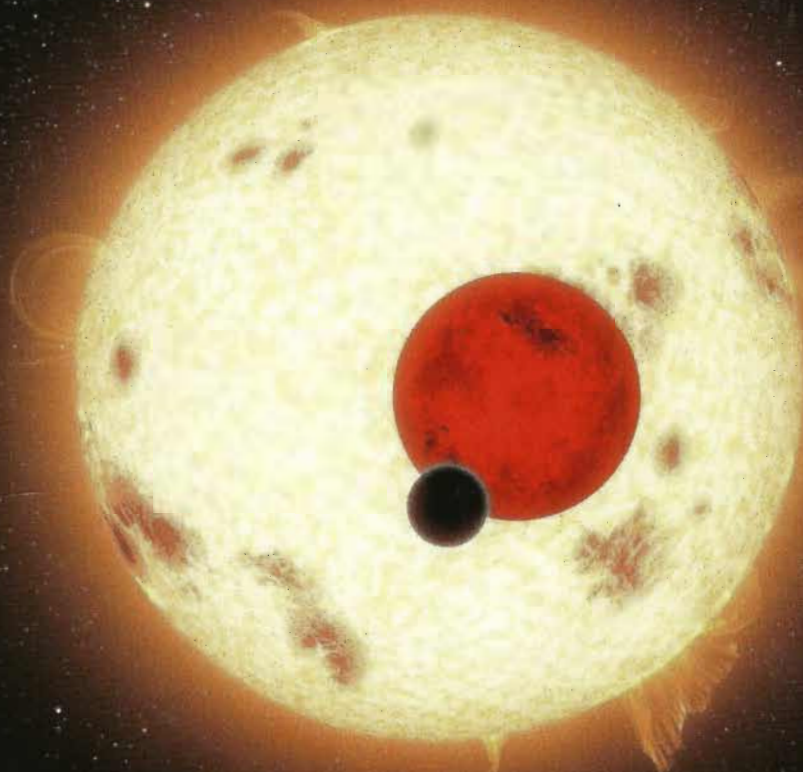


Los exoplanetas

Otras tierras en torno
a otros soles



Un paseo por el
COSMOS

EXLIBRIS Scan Digit



The Doctor y La Comunidad

Redigitalización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmoreau.blogspot.com/>

Los exoplanetas

Otras tierras en torno
a otros soles

RBA

Imagen de cubierta: La imagen recrea el planeta extrasolar Kepler-16b, que orbita un sistema estelar binario, formado por una enana naranja y una enana roja. Se trata de un planeta gaseoso, de un tamaño similar al de Saturno y separado de la Tierra por unos doscientos años-luz de distancia.

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© Arturo Quirantes Sierra por el texto
© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.
© 2016, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Archivo RBA: 18, 147; Áwá/Wikimedia Commons: 59; John de Dios/Scryer Media Services: 127a; ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum), MOC (Malin Space Science Systems): 141; ESA/ÖWF-P. Santek: 115; ESO/L. Calçada: 35b; ESO/L. Calçada/ N. Risinger: 85b; ESO/M. Kornmesser/Nick Risinger: 103a; Lcamtuf/Wikimedia Commons: 28; Felix Lipov: 19; NAIC/Arecibo Observatory: 63; NASA: 85a, 140; NASA Ames/JPL-Caltech/T. Pyle: 121b; NASA Ames/ W. Stenzel: 99; NASA/ESA/Cortesía de Josh Lake: 77b; NASA/ESA/ Space Telescope Science Institute: 77a; NASA/Gemini Observatory/ Lynette Cook: 45; NASA/JHUAPL/SwRI: 21a; NASA/JPL-Aldaron: 103b; NASA/JPL-Caltech: portada; NASA/JPL-Caltech/T. Pyle: 109; NASA/ JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA: 21b; NASA, Scott Kelly: 139; NASA/ Pat Rawlings (SAIC): 127b; NASA/SDO: 55; NASA/JPL/Space Science Institute: 37; NASA/Space Telescope Science Institute: 35a; NASA/ Universidad de Cornell/NSF: 121a; Smithsonian Institution: 93.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-8564-5
Depósito legal: B-13059-2016

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)
Impreso en España - Printed in Spain

SUMARIO

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1	Qué es un planeta 13
CAPÍTULO 2	La vida de los planetas 31
CAPÍTULO 3	En modo de detección 47
CAPÍTULO 4	Nuevos métodos de búsqueda 71
CAPÍTULO 5	Enciclopedia planetaria 95
CAPÍTULO 6	Exoplanetas y vida 111
CAPÍTULO 7	¿Hay alguien ahí? 135
LECTURAS RECOMENDADAS	155
ÍNDICE	157

«Hay un solo espacio general, una vasta inmensidad única a la que podemos llamar libremente vacío: en él están los orbes innumerables como este en el que vivimos y crecemos.»

Cuando el siglo XVI tocaba a su fin, el autor de esas palabras esperaba su sentencia de muerte en una cárcel de Roma. Era un hombre letrado, profesor de filosofía y catedrático en universidades de Italia y Francia, lo que hoy llamaríamos un librepensador. Su carácter polémico y su negativa a plegarse al poder establecido, a pesar de que hubiera sido más prudente hacerlo, le granjearon no pocos enemigos. Aun así, se negó a callar. Pero sus ideas sobre teología fueron consideradas heréticas y, tras ocho años de encarcelamiento, fue finalmente condenado por la Inquisición y ejecutado. Su nombre era Giordano Bruno. Murió en la hoguera el 17 de febrero de 1600 en la plaza Campo de' Fiori de Roma.

Existe la tendencia de convertir a Bruno en un mártir del secular enfrentamiento entre ciencia y religión. Es cierto que él postulaba un universo infinito, lleno de mundos como el nuestro, donde otros seres semejantes a nosotros podrían rendir culto a su propio Dios. Pero sus visiones eran las de un filósofo, no las

de un científico, y sus opiniones, consideradas heréticas y blasfemas, pesaron mucho más que su apoyo a las ideas copernicanas. A pesar de ello, se le reconoce el mérito de haber alzado la voz para proclamar que, tal vez, solo tal vez, nuestro mundo no sea único en su género.

Años después, el mismo cardenal que hizo ejecutar a Giordano Bruno ordenó una investigación sobre las actividades de otro pensador peligroso para la Iglesia. Se trataba de Galileo Galilei, el primer astrónomo que pudo usar un telescopio para explorar el cielo con detalle. Al igual que Bruno, este hombre tenía ideas radicales sobre el universo, pero tenía algo más: pruebas. Sus observaciones sobre las fases de Venus y las montañas de la Luna demostraron que el orbe celeste, antaño considerado perfecto en tanto que obra y hogar de Dios, contenía imperfecciones carentes de una explicación teológica. Peor aún, descubrió que el planeta Júpiter tenía su propio conjunto de mundos, los satélites hoy llamados «galileanos» en su honor.

También Galileo fue acusado de herejía por la Inquisición. Sus pruebas no sirvieron de nada frente a tantos hombres que se negaban a abandonar sus creencias, y ni siquiera su amistad con el papa Urbano VIII fue suficiente para conseguir una absolución. Afortunadamente, Galileo supo plegarse en el último momento y abjurar de sus ideas, algo que el inflexible Bruno no quiso o no pudo hacer. Se cuenta que Galileo, vencido pero no convencido, plasmó su rebeldía en la célebre frase *eppur si muove*. Es decir: «Y sin embargo, se mueve».

Como ya sabemos, Galileo se refería a que la Tierra se movía alrededor del Sol, tal y como explicaba la teoría heliocéntrica de Copérnico entonces en boga, pero fue mucho más lo que se movió a partir de entonces. Los hombres disponían de una herramienta nueva, la ciencia, gracias a la cual plantearse hipótesis arriesgadas no sería solamente cuestión de fe: podrían comprobarse o refutarse mediante demostraciones científicas.

En los siglos que siguieron la ciencia permitió al hombre avanzar en el conocimiento a todas las escalas. Se comprobó que todos los planetas exteriores a la Tierra tienen satélites girando a su alrededor, algunos incluso cuentan con bellos sistemas de

anillos. En cuanto a las estrellas, esos puntos brillantes que vemos en el cielo nocturno, descubrimos que se tratan de soles semejantes al nuestro y, además, que son más numerosos y diversos de lo que podíamos imaginar.

También se avanzó en lo concerniente a la búsqueda de otros mundos. La toma de meticulosas medidas de la órbita de Urano, llevadas a cabo en el siglo XIX, permitieron descubrir ciertas irregularidades que no admitían explicación alguna, a no ser que hubiese otro gran cuerpo celeste no descubierto hasta entonces. Partiendo de la ley de gravitación de Newton, los astrónomos pudieron deducir la existencia de un nuevo planeta, que fue bautizado con el nombre de Neptuno. Se trató de un hito en la historia de la física. Por primera vez, la existencia de un planeta había sido sugerida por la deducción antes que por la observación.

Más tarde, Plutón fue descubierto de la misma forma: deducción primero, observación después. Desde hace años, un grupo de astrofísicos del instituto Caltech estudia las órbitas de diversos objetos transneptunianos y afirma que, a partir de ciertas particularidades detectadas en ellas, se puede deducir la existencia de un nuevo planeta más allá de Neptuno. Que se trate finalmente de una mera coincidencia o que sea la antesala de un nuevo descubrimiento está aún por determinar, pero ya se están iniciando proyectos de búsqueda para confirmar o refutar la existencia del que, por el momento, recibe el nombre de Planeta Nueve (ya que en la actualidad Plutón no está clasificado como planeta).

¿Pero qué hay de los mundos más allá de nuestro sistema solar? A fin de cuentas, si hay estrellas similares a la nuestra, no hay motivo para que no tengan también un sistema planetario propio. Tal vez, si se dan las condiciones adecuadas, algunos de esos mundos puedan tener vida, seres inteligentes, civilizaciones. Pero la ciencia no se basa en conjeturas, y las dificultades para encontrar pruebas de la existencia de planetas extrasolares son enormes. Las distancias casi inconcebibles que nos separan de las demás estrellas hacen que, incluso con los mejores instrumentos, aparezcan como poco más que puntos de luz, de modo

que buscar cuerpos mucho más pequeños carentes de luz propia parece misión imposible.

A pesar de ello la búsqueda comenzó hace tiempo. Gracias al ingenio de los científicos y a la habilidad de los ingenieros, se desarrollaron métodos de detección cada vez más precisos y sensibles para descubrir planetas fuera de nuestro sistema solar, unos cuerpos celestes que reciben el nombre genérico de «planetas extrasolares», o «exoplanetas». Los científicos iniciaron la exploración de todas las posibles pistas que pudieran permitir deducir la existencia de un exoplaneta: cambios en el brillo de una estrella, en su posición, en su velocidad, en el desplazamiento de la luz por su espacio circundante... Por su parte, los técnicos comenzaron la construcción del instrumental necesario. Cada vez que un investigador pedía más prestaciones a sus instrumentos, el ingeniero hacía un nuevo esfuerzo y los mejoraba. Este implacable proceso se repitió una y otra vez y, como consecuencia, los límites a la detección se siguieron superando. Crecía la habilidad para hacer visible lo invisible.

Pero los exoplanetas se resistían a ser observados. Son demasiado pequeños, demasiado lejanos, demasiado esquivos. Así que el grado de precisión continuó aumentando, y técnicas que se pensaba imposibles dejaron de serlo. Como un árbol que permanece en pie a pesar de los repetidos golpes de hacha, el problema de la búsqueda de mundos lejanos se resistía a ceder. Hasta que finalmente sucedió. En el año 1860, cuando la amenaza de una guerra civil se cernía en el horizonte de Estados Unidos, la luz de una estrella llamada HD 114762 abandonó su superficie. Más de un siglo después, en 1989, un grupo de astrofísicos norteamericanos captó esa luz y, tras analizar la información que contenía dedujeron que alrededor de la estrella giraba un mundo nuevo, un gigante gaseoso que deja pequeño a Júpiter. Su estatus de exoplaneta, sin embargo, no fue confirmado hasta 2012.

La existencia de otros mundos en torno a estrellas lejanas ha pasado de ser una posibilidad a una realidad comprobada. De hecho, si los planetas son tan comunes en el universo como en las estrellas que hemos examinado, podemos estar hablando de millones, tal vez de miles de millones de planetas tan solo en

nuestra galaxia. Es posible que lo atípico para un sol no es que tenga planetas, sino lo contrario, que carezca de ellos. Las técnicas de detección siguen su proceso de mejora, como podrá apreciar el lector en este libro, y el número de exoplanetas seguirá aumentando.

Es entonces, o sea ahora, cuando nos planteamos la siguiente gran pregunta. La relativa a si existen planetas en otros soles ya ha quedado respondida, pero ¿se trata de cuerpos carentes de vida o, como soñó Giordano Bruno, son mundos vibrantes y llenos de vida, donde criaturas semejantes a nosotros alaban a sus dioses particulares? Nuevamente se plantea un reto observacional, y otra vez los hombres y mujeres que buscan vida en el cosmos exploran las posibilidades y proponen nuevas técnicas de detección. Lo más sencillo parece buscar vida inteligente. Si, como nosotros, usan la ciencia y la tecnología para controlar y dominar su medio ambiente, puede que también construyan radiotelescopios, pongan satélites en órbita y nos busquen de la misma forma que nosotros los buscamos a ellos. O quizá usen técnicas que todavía nos sean extrañas.

Resulta irónico que, hasta hace algunas décadas, los proyectos planteados para localizar inteligencia extraterrestre (los SETI, *Search for Extra Terrestrial Intelligence*) se considerasen una actividad frívola indigna de científicos serios, más cercana a pseudociencias como la ufología o la caza de fantasmas. Los pocos que lo intentaban se enfrentaban al ostracismo y a las burlas de los demás. En años recientes, sin embargo, las actividades del campo SETI han cobrado una nueva relevancia. Parece como si, tras confirmar la existencia de exoplanetas, la búsqueda de inteligencia extraterrestre fuese el siguiente paso lógico. Incluso se ha desarrollado una nueva ciencia para estudiar la vida en el universo más allá de nuestro planeta: la astrobiología.

Por el momento, esta nueva ciencia no tiene, técnicamente, nada que estudiar todavía, pero el mero hecho de haberle dado nombre indica que hemos reconsiderado la idea de la existencia de vida en el universo. Es cierto que, hace treinta años, cuando no había la menor evidencia sobre la presencia de planetas extrasolares, no nos lo planteábamos; pero ahora, con cente-

nares de exoplanetas ya confirmados, parece como si el descubrimiento de otras formas de vida fuese solamente cuestión de tiempo.

O, quizá, lo que sucede realmente es que, en el fondo, ya estamos pensando en colonizar esos nuevos mundos que aún ni siquiera hemos descubierto. Que todo podría ser.

Qué es un planeta

El descubrimiento de nuevos cuerpos parecidos a Plutón forzó a los científicos a plantearse qué es un planeta y qué características lo hacen diferente de otros objetos celestes, al tiempo que generó una nueva taxonomía planetaria. Distinguir un planeta de una estrella no es tarea fácil.

Durante gran parte del siglo xx los niños aprendieron en la escuela que el sistema solar contenía nueve planetas: Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno y Plutón. Este último había sido descubierto en 1930 por el astrónomo estadounidense Clyde Tombaugh (1906-1997), siguiendo la senda iniciada por Percival Lowell (1855-1916). Lowell, un rico hombre de negocios aficionado a la astronomía, buscó durante años un hipotético planeta X, en un intento por explicar ciertas anomalías en la órbita de Neptuno, planeta que, a su vez, fue descubierto de forma similar. Los demás planetas eran conocidos desde la antigüedad.

A pesar de su pequeño tamaño y su lejanía, Plutón es el preferido por los niños estadounidenses. Tan solo unos meses después de que el planeta fuese descubierto, Walt Disney creó un personaje animado, un simpático perro que recibió el mismo nombre que tiene el planeta en inglés (*Pluto*), aunque en realidad el pequeño planeta fue bautizado como el dios mitológico romano, un nombre cuyas dos primeras letras, P y L, servían además para homenajear a Percival Lowell.

Con la llegada del nuevo milenio, el Centro Rose para la Tierra y el Espacio (parte del Planetario Hayden del Museo Ameri-

cano de Historia Natural de Nueva York) abrió una nueva exhibición dedicada a los cuerpos del sistema solar. Para sorpresa de los visitantes, Plutón no se encontraba entre el grupo de los planetas. Y es que, tras el descubrimiento de varios cuerpos de tamaño y masa similar en el llamado cinturón de Kuiper, el director de dicho centro, el astrofísico y célebre divulgador científico Neil deGrasse Tyson, pensó que no tenía sentido considerar a Plutón como planeta mientras que los cuerpos celestes recién descubiertos se catalogaban como subplanetas. Así que decidió «degradarlo». Para él, Plutón no podía ser realmente un planeta.

La decisión de Tyson provocó un terremoto. Muchos niños de primaria le enviaron cartas amenazadoras y el presentador de televisión Jon Stewart lo apodó «el hombre que mató a Plutón». En 2006, la Sociedad Americana de Dialectos (*American Dialect Society*) escogió como palabra del año el término *plutonear* («degradar o devaluar algo o a alguien, como le sucedió al ex planeta Plutón»). Pero más allá de la anécdota, la reclasificación del objeto anteriormente conocido como planeta Plutón puso de manifiesto una pregunta que se hicieron los participantes en la polémica, muchos de ellos por vez primera en su vida: ¿qué es un planeta?

Agrupar un conjunto de cuerpos y decir «estos son los planetas del sistema solar» es una tarea insatisfactoria para un astrofísico. Sabemos qué es una galaxia, un satélite, un cometa, un asteroide. Son fáciles de definir y sobran los ejemplos; pero, por alguna razón, la lista de los planetas se memoriza y se acepta sin necesidad de plantear definición alguna. Nuestros antepasados romanos, griegos y fenicios tampoco le dedicaron mucha atención al asunto. Para ellos existía el Sol, la Luna y un conjunto de puntos luminosos que resplandecen en la oscuridad del cielo nocturno, las estrellas. Cinco de ellas parecían moverse de forma distinta a las demás. Dependiendo de la época del año, avanzaban y retrocedían respecto a las demás estrellas, y lo hacían de forma caprichosa. Los antiguos griegos los llamaron «planetas» (de la palabra griega que significa «vagabundo» o «errante») y los romanos les otorgaron nombres de dioses que han llegado

hasta nuestros días: Mercurio el mensajero, Venus la diosa de la belleza, Marte el dios de la guerra, Júpiter el padre de los dioses, Saturno el señor del tiempo.

Durante siglos, ese fue todo el contenido del universo conocido, a excepción de los cometas. Estos visitantes ocasionales e imprevisibles de nuestro cielo eran recibidos como heraldos de una inminente catástrofe; pero, aparte de ellos y de alguna que otra supernova, los cielos permanecían inalterables. Una situación que cambió en 1609 cuando el astrónomo italiano Galileo Galilei (1564-1642) usó su telescopio para examinar el planeta Júpiter. Descubrió, con gran sorpresa por su parte, que había cuatro cuerpos girando alrededor del mismo, a los que hoy conocemos con el nombre de «satélites galileanos». Saturno llamó también su atención cuando observó unos extraños apéndices que su pequeño telescopio no pudo identificar y que forman su espectacular sistema de anillos. Las observaciones de Galileo pusieron en evidencia que los cielos estaban más poblados de lo que se creía en un principio.

Incluso el número de planetas sufrió alteraciones. La teoría heliocéntrica expuesta en el año 1543 por el astrónomo polaco Nicolás Copérnico (1473-1543) estableció que el Sol es el centro del universo y que, en torno a él, giran todos los demás planetas, incluida la Tierra. Nuestro mundo perdió entonces su posición privilegiada: de ser el centro del universo pasó a convertirse en un planeta más. Dos siglos después, en 1781, el astrónomo inglés de origen alemán William Herschel (1738-1822) descubrió desde el observatorio de su casa de Bath, en Somerset, un nuevo planeta que recibió el nombre de Urano. Era el séptimo de la lista. El octavo fue Neptuno, predicho de forma simultánea por el francés Urbain Le Verrier (1811-1877) y el inglés John Couch Adams (1819-1892), y avistado por vez primera en 1846.

Solía pensar en lo bonito que sería visitar los planetas. Por supuesto, no esperaba verlo en vida. Sabía que iba a suceder algún día, pero sucedió mucho más rápido de lo que pensé *a priori*.

CLYDE TOMBAUGH

¿ES PLUTÓN UN PLANETA? EN MI CASA, SÍ

Cuando el Museo Americano de Historia Natural de Nueva York clasificó a Plutón como un no-planeta, el *New York Times* recogió la noticia en portada con el típico humor neoyorquino: «¿Plutón no es un planeta? Solo en Nueva York». La caída en desgracia de Plutón no fue aceptada por todo el mundo. Entre los rebeldes se encontraban tanto astrofísicos, como escolares, amantes del mundo Disney y, al menos, dos estados norteamericanos: Illinois y Nuevo México, lugares donde Clyde Tombaugh, en la imagen, nació y murió, respectivamente. Contrariado porque su hijo predilecto había dejado de ser el descubridor de un planeta «verdadero», el congreso del estado de Nuevo México aprobó en 2007 una resolución en la que Plutón era declarado de nuevo como planeta. Dos años después, Illinois aprobó una resolución similar. Según los legisladores de ese estado, Plutón había sido injustamente degradado a «planeta enano» y, en consecuencia, se le declaraba restablecido «con estatus planetario completo». En ambos casos los motivos fueron fundamentalmente sentimentales: los dos estados actuaron en apoyo de uno de sus ciudadanos más célebres.

Argumentos sentimentaloides

Muy distinto fue el caso de California, estado que alberga la sede de la empresa Disney y varios parques temáticos. La patria chica de Pluto defendió también a su «hijo predilecto» y, el mismo día que la Unión Astronómica Internacional definió a Plutón como no-planeta, los miembros de la cámara legislativa de California presentaron de forma conjunta y casi unánime un borrador de resolución condenando la acción y aduciendo toda una panoplia de argumentos: defensa de la empresa Disney (aunque disimulada bajo eufemismos como «Pluto [Plutón]... tiene una conexión especial con la historia y cultura de California»); económicos (con alusiones a «millones de libros de texto, exhibiciones de museos y proyectos de arte infantiles colgados en frigoríficos»); educativos («millones de californianos aprendieron que Plutón es el noveno planeta del sistema solar»); fundamentalistas («la degradación de Plutón como planeta es... una



Clyde Tombaugh descubrió Plutón con un microscopio de parpadeo, que mide variaciones en el brillo de objetos celestes.



La causa plutoniana fue quizá una de las resoluciones más originales presentadas jamás en la Asamblea del Estado de California (en la imagen). Afortunadamente, quedó en nada. La «resolución plutoniana» no llegó a presentarse.

herejía similar a cuestionarse la teoría de Copérnico»); políticos («reduce el número de planetas disponibles para que los legisladores puedan disimular... otras medidas de reforma política inconvenientes»); fiscales («impacto sobre... la salud fiscal a largo plazo del Estado»).

La causa plutoniana en la Asamblea del Estado de California

Por supuesto, nada de todo aquello iba en serio. El parlamento de California, en la fotografía, se hallaba cerca de terminar la legislatura de 2005-2006, y los congresistas del Estado Dorado decidieron montar una broma a expensas de la controversia plutoniana. La resolución, de nombre HR 36, nunca fue presentada a votación y murió plácidamente el 30 de noviembre de 2006. En cualquier caso, los honorables legisladores podían haberse ahorrado el trabajo: las decisiones de la Unión Astronómica Internacional no son legalmente vinculantes.

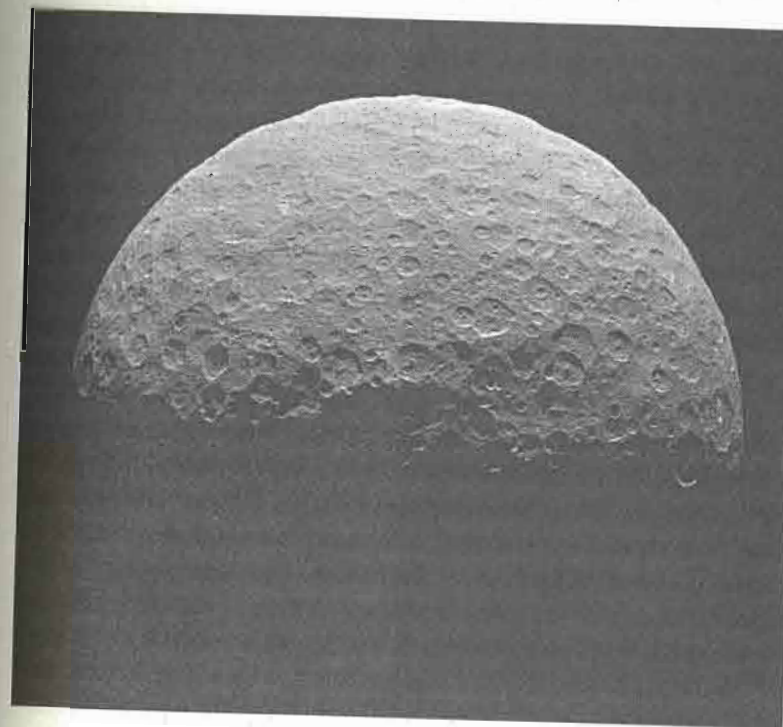
CUERPOS TRANSNEPTUNIANOS Y OBJETOS CELESTES SIN CLASIFICAR

En el intervalo que hubo entre el descubrimiento de Urano y Neptuno, los astrónomos hallaron una nueva clase de cuerpos celestes en órbita alrededor del Sol. En el primer día del siglo XIX, el astrónomo italiano Giuseppe Piazzi (1746-1826) descubrió un cuerpo que hoy recibe el nombre de Ceres (véase la imagen inferior de la página contigua). Desde hacía tiempo se sospechaba de la existencia de un cuerpo orbitando entre las órbitas de Marte y Júpiter, de modo que cuando Ceres fue descubierto hubo pocas dudas de que se trataba de un planeta por derecho propio. Sin embargo, en menos de una década se avistaron otros tres cuerpos similares llamados Palas, Vesta y Juno.

El número de estos nuevos planetas creció con rapidez. Al comenzar el año 1850 habían sido descubiertos diez de estos objetos, una década después eran 57 y, para cuando empezó el siglo XX, la lista tenía ya 463 miembros. También resultó extraño su pequeño tamaño: el más grande de ellos, el propio Ceres, tiene el tamaño de la península Ibérica. Pronto se hizo evidente que los nuevos cuerpos (a excepción de Neptuno) constituían una nueva clase. En 1802, Herschel propuso para ellos el nombre genérico de *asteroides* (que significa «con forma de estrella») y, aunque el nombre no es muy acertado, acabó afianzándose. Ceres pasó de ser el planeta más pequeño a convertirse en el asteroide más grande.

El descubrimiento y posterior degradación de Plutón siguió un camino similar. Lo cierto es que, desde el principio, demostró ser un planeta con propiedades atípicas. Su órbita es tan excéntrica, es decir, tan alejada de la forma de una circunferencia, que cruza la de Neptuno, y su masa es treinta veces inferior a la de Mercurio, el segundo planeta más ligero. Hay siete satélites más grandes orbitando los otros planetas. Incluso nuestra propia Luna lo supera en masa y tamaño. Los astrofísicos se llevaron otra sorpresa en 1978 al descubrir que Plutón tenía un satélite con casi la mitad de su tamaño.

Es, en todo, un cuerpo que no encaja bien en el club planetario, pero no se hizo evidente hasta medio siglo después de su



La imagen superior muestra la superficie de Plutón captada por la sonda New Horizons. Abajo, Ceres, otro de los considerados «planetas enanos», en una fotografía de la sonda Dawn. Ceres se localiza entre las órbitas de Marte y Júpiter, en medio del llamado cinturón de asteroides, poblado por objetos de pequeño tamaño de forma irregular. Con un diámetro de unos 950 km, Ceres es el mayor de ellos.

descubrimiento porque su pequeño tamaño y su lejanía del Sol lo convierten en un pequeño punto, incluso cuando es observado mediante los más potentes telescopios. Las medidas de su masa efectuadas a lo largo de las décadas eran muy inciertas, y no fue hasta finales del siglo xx cuando se comenzó a sospechar que era demasiado pequeño para ser un planeta. Ahora conocemos mucho más sobre Plutón gracias al sobrevuelo de la sonda de la NASA New Horizons (Nuevos Horizontes) en el verano de 2015, como evidencia la fotografía superior de la página anterior. Entre otros datos conocemos su diámetro, que es de 2370 km.

Pero, aunque el pequeño tamaño de Plutón es un rasgo de su peculiaridad, eso no lo descalifica como planeta. Con los 950 km de diámetro de Ceres y los 4900 de Mercurio como límites, los astrónomos tienen libertad para situar la frontera entre asteroide y planeta. No hay, en principio, ningún motivo para no aceptar al pequeño Plutón como planeta. A no ser que, al igual que en el caso de Ceres, suceda que Plutón forme parte de un grupo de cuerpos similares en tamaño y composición. Y eso es lo que sucedió.

Durante la primera década del siglo xxi los astrofísicos encontraron en el llamado cinturón de Kuiper, más allá de la órbita de Neptuno, diversos cuerpos que en la actualidad se agrupan en la categoría de Objetos Transneptunianos. En 2003, dos grupos de investigadores encontraron de forma simultánea un planeta enano bautizado como Haumea, con un tamaño levemente inferior al del asteroide Ceres. Ese mismo año apareció Sedna, con un diámetro de casi dos mil kilómetros. Finalmente, en el año 2005 se anunció el descubrimiento de Eris, un planeta con tamaño y masa comparables a los de Plutón.

La aparición de Eris provocó un recrudecimiento de la polémica por el estatus planetario de Plutón: o bien ambos son planetas, o bien no lo son. El hecho de que Sedna tuviera un tamaño apenas un 20% inferior al de Plutón era asimismo un recordatorio de que, conforme se encontrasen más cuerpos transneptunianos, la distinción entre planeta y no-planeta en base a su tamaño sería cada vez más difícil. Era necesario replantearse el concepto desde su raíz.

LLEGA LA HORA DE DEFINIR UN PLANETA

La responsabilidad de determinar qué es un planeta corresponde por convenio a la Unión Astronómica Internacional (UAI). En 1990 esa asociación tuvo que emitir un comunicado en el que desmintió cualquier intención de desalojar a Plutón de la categoría de planeta, pero los descubrimientos de nuevos objetos transneptunianos forzaron un replanteamiento de la situación y el 24 de agosto de 2006 la UAI aprobó en sesión plenaria una resolución que describe las condiciones que un cuerpo celeste debe cumplir para ser considerado planeta. Se trata de las siguientes:

- Orbitar alrededor del Sol.
- Tener una masa suficiente para alcanzar el equilibrio hidrostático.
- Haber limpiado su órbita de otros cuerpos extraños.

La condición primera no es suficiente (hay objetos girando alrededor del Sol que no son planetas), pero es necesaria. La segunda es una forma técnica de decir que el cuerpo tiene la suficiente gravedad como para adoptar una forma esférica o esferoidal, lejos de las formas irregulares que suelen adquirir los objetos con masa pequeña. En cuanto a la tercera, intenta garantizar que la órbita del objeto esté dominada solamente por él mismo, y que su gravedad sea lo bastante intensa para atraer o expulsar otros objetos en su cercanía.

Según las nuevas normas, cuerpos como Plutón, Eris o el asteroide Ceres, al no cumplir la tercera condición, deberían pasar a la categoría de *planetas enanos*, pero doscientos años de tradición pesan mucho y para algunos resultaba extraño hablar del planeta enano Ceres. Hubo también quienes vieron en el término «planeta enano» algo incongruente desde el punto de vista semántico. Enano o no, un planeta es un planeta, y hablar de «planeta enano» como algo distinto a un planeta era como decir que

el halcón peregrino no es un halcón. Finalmente, la UAI cortó por lo sano y acuñó un nuevo término para los planetas enanos transneptunianos: *plutoides*. Plutón pasó así de ser el planeta más pequeño a ser el plutoide más grande; en cuanto a Ceres, pudo seguir siendo un asteroide.

PLANETAS MÁS ALLÁ DE NUESTRO SISTEMA SOLAR

El concepto de equilibrio hidrostático o la capacidad de un cuerpo celeste de limpiar su órbita pueden parecer condiciones arbitrarias y, de hecho, algunos científicos las discuten todavía, pero al menos proporcionan una forma razonada de definir un planeta. La taxonomía de nuestro sistema solar ha quedado fijada. A partir de ahora, cualquier nuevo objeto que orbite nuestro Sol y sea descubierto podrá ser clasificado de una forma ordenada y razonada.

¿Pero cómo clasificaremos los planetas que pueda haber fuera del sistema solar? Hasta hace poco el problema ni siquiera se había planteado ya que no había constancia de que existieran. Los avances técnicos en los últimos años, sin embargo, han permitido detectar centenares de nuevos planetas a distancias interestelares. Ahora el problema de la clasificación se hace más agudo que nunca y la definición de la UAI se convierte en papel mojado.

Según las normas vigentes, cuando hablamos de «planeta» asumimos que está en órbita alrededor de un sol. En el caso de otros sistemas solares, por supuesto, ese sol será el suyo propio, no el que vemos en nuestro cielo diurno. Ahora bien, un planeta puede formar parte de un sistema de dos estrellas; o de otros cuerpos más exóticos como estrellas de neutrones, púlsares o incluso agujeros negros. De hecho, ¿por qué un planeta ha de girar en torno a otro objeto? Las teorías actuales sobre formación de sistemas solares aceptan como posible que un planeta abandone su sistema solar y se convierta en un auténtico vagabundo interestelar, libre de ataduras.

Existe otro problema que hasta ahora no nos habíamos planteado, y es el de diferenciar un planeta de una estrella. En nuestro sistema solar la distinción es fácil: el Sol brilla por sí solo,

el planeta es visible por la luz que refleja. La Real Academia Española utiliza esta distinción en su definición de planeta y cualquier niño de primaria aprende así a clasificar cuerpos celestes. Eso bastaba antes. Ahora, con miles de millones de sistemas planetarios potenciales tan solo en nuestra galaxia, las diferencias no son siempre tan claras.

Imaginemos que por algún mecanismo pudiésemos eliminar masa de nuestro Sol. ¿En qué punto se detendría la fusión de hidrógeno convirtiéndose en un cuerpo inerte? La masa límite se estima en una cantidad aproximadamente igual a unas 80 veces la masa de Júpiter (un 8% de la masa del Sol). Por debajo de esa cantidad, una estrella es incapaz de producir la fusión del hidrógeno, dando lugar a lo que se conoce como una *enana marrón*, una estrella fallida.

Pero incluso una enana marrón es capaz, en ocasiones, de producir una reacción termonuclear. La condición pasa por activar un tipo de fusión en que el combustible es un isótopo del hidrógeno llamado deuterio. El hidrógeno común (también llamado protio) y el deuterio son químicamente iguales, y solamente se diferencian en su núcleo atómico (el deuterio tiene un neutrón, el protio no). El deuterio es escaso y una estrella que lo utilizase como fuente de energía no duraría mucho, pero es en principio posible que una enana marrón pueda acumular deuterio y fusionarlo en lugar del hidrógeno común para producir reacciones termonucleares.

Gracias al deuterio, tenemos un criterio para establecer un límite inferior más pequeño a la posible masa de una estrella. La frontera entre estrella y no-estrella está siendo fuertemente debatida por los astrofísicos, y las últimas estimaciones sitúan el límite en una masa de unas 13 veces la de Júpiter. Por debajo de esa cantidad, una masa de hidrógeno puede colapsar en un objeto compacto debido a su propia gravedad, pero no se convertirá en un reactor nuclear de fusión. Esto significa que en el límite inferior de la evolución estelar tenemos objetos con masa

Hay una gran cuestión que todos compartimos: ¿estamos solos en el universo? Los exoplanetas confirman la sospecha de que los planetas no son tan raros.

NEIL DEGRASSE TYSON

de entre 1 y 13 veces la de Júpiter, formados tras el colapso de una nube de gas, que nunca producirán por sí solos reacciones termonucleares; son las llamadas *subenanas marrones*.

Si nos fijamos en los planetas en lugar de las estrellas, debemos considerar cuerpos como Júpiter, los *gigantes gaseosos*, llamados así porque están formados por una gruesa atmósfera de hidrógeno y helio en torno a un núcleo rocoso. Si apilásemos suficiente deuterio en la superficie de uno de esos gigantes planetarios podría llegar al límite de la fusión termonuclear y convertirse en una estrella (ese es el argumento de la película de ciencia ficción *2010: Odisea Dos*). Algunos planetas extrasolares superan en más de 25 veces la masa de Júpiter, lo que permitiría clasificarlos como subenanas marrones.

El universo, por tanto, dispone de la capacidad de crear cuerpos muy similares en tamaño y masa, aparentemente iguales pero de procedencia distinta. Las diferencias subyacen en su interior y vienen determinadas por su historia pasada: una subenana marrón se compone de hidrógeno casi en su totalidad, mientras que un gigante gaseoso se forma a partir de la condensación de material en la forma de un núcleo rocoso, posteriormente recubierto por una gruesa capa gaseosa.

El problema taxonómico que se nos plantea no es fácil de resolver, y la presión aumenta cuando comprobamos que, lejos de ser un dilema bizantino, tiene aplicación práctica inmediata. En años recientes hemos descubierto cuerpos celestes con características que pueden ser de un planeta o de una estrella. Incluso la habitual clasificación basada en la temperatura o la producción de energía mediante reacciones nucleares de fusión deja de ser fiable. La creencia habitual de que una estrella está muy caliente se sacudió al encontrar varias enanas marrones absurdamente frías. Una de ellas, conocida como WISE 1828+2650, tiene una temperatura superficial inferior a la del cuerpo humano. Temperaturas tan bajas para una estrella dictan asimismo que su producción de luz visible es prácticamente nula, así que la única forma de detectarla sería mediante observaciones en el infrarrojo.

Algunas de las subenanas marrones encontradas hasta ahora tienen una masa de apenas tres veces la de Júpiter. Otras llegan

al límite de 13 masas jupiterinas que se ha establecido (más o menos arbitrariamente) como frontera entre estrella y planeta. El número de cuerpos celestes de tipo planetario que se están encontrando aumenta casi a diario, y cada vez se hace más difícil clasificarlos. La frontera entre planetas y estrellas ya no es clara y definida.

La propia Unión Astronómica Internacional parece haber tirado la toalla en este asunto. A falta de un criterio mejor, las normas aceptadas se basan en la masa y en la ubicación. Un cuerpo con masa superior a 13 veces la de Júpiter es una enana marrón. Cuando la masa es inferior pueden pasar dos cosas:

1. Que se encuentre en órbita alrededor de estrellas (o de restos de estrellas, como púlsares o agujeros negros), en cuyo caso se considerará planeta, con independencia de su origen o formación.
2. Que esté en vuelo libre por el espacio, en cuyo caso es una subenana marrón.

Según esa definición, el propio planeta Júpiter podrá pasar de planeta a subenana en el momento en que salga de su órbita y abandone el sistema solar. Puede sonar absurdo, pero recordemos que nuestra propia Luna sería un planeta si orbitase en torno al Sol. El debate sobre qué es un planeta está muy lejos de cerrarse. Ni en el extremo de pequeño tamaño ni en el de masa grande hay un criterio claro y capaz de resolver el problema.

Necesitamos dar un paso atrás con objeto de ver el bosque más allá de los árboles individuales. Cuando el astrofísico Neil deGrasse Tyson decidió dejar a Plutón fuera de la lista de planetas, su intención fue agruparlo con otros cuerpos más parecidos en cuanto a tamaño, composición y evolución. Plutón y Eris tienen muchos más elementos en común con los objetos transneptunianos del cinturón de Kuiper que con el gigante gaseoso Júpiter o con el árido y rocoso Marte. La decisión fue socialmente polémica, pero tiene sentido desde el punto de vista científico.

LA IRRADIACIÓN COMO MEDIDA

Para medir la temperatura de un objeto suele bastar con ponerlo en contacto directo con un termómetro. Esa opción no es factible para cuerpos lejanos, pero los astrónomos disponen de otro procedimiento: medir la radiación electromagnética que emite un objeto y relacionarla con su temperatura. Un cuerpo caliente emite energía en diversas frecuencias, y en determinadas circunstancias puede modelarse como un emisor ideal llamado *cuerpo negro*. En 1893, el físico alemán Wilhelm Wien dedujo la ley que relaciona la temperatura (en kelvins; 0 °C corresponden aproximadamente a 273 K) de un cuerpo negro con la longitud de onda (en metros) en la que emite con mayor potencia:

$$\lambda = \frac{0,002898}{T}$$

Las estrellas pueden asemejarse a esos cuerpos negros y la ley de Wien permite estimar su temperatura superficial. La irradiación máxima para nuestro Sol sucede a $\lambda=500$ nanómetros (milmillonésimas de metro), lo que corresponde a una temperatura de unos 5.800 K. La siguiente estrella más brillante de nuestro cielo, Sirio, brilla con un máximo correspondiente a una temperatura de 10.000 K y la mayor parte de su radiación se emite en la franja ultravioleta; Antares, con apenas 3.400 K, tiene su pico de máxima emisión en el infrarrojo cercano. El hecho de que también irradian en longitudes de onda visible nos permite observarlas en el cielo nocturno con los ojos. No es el caso del cuerpo humano que, con 310 K de temperatura, emite en longitudes de onda infrarrojas. Lo que significa que si podemos verlos es gracias a la luz reflejada por otros cuerpos, no a la que emitimos nosotros.



Termograma de un gato. Los colores brillantes indican temperaturas altas; los oscuros, zonas de temperatura baja.

De modo similar, el debate sobre qué es un planeta y qué es una estrella debe centrarse en su origen y composición. La sugerencia de clasificar como estrella a todo cuerpo con una masa suficiente para crear reacciones termonucleares permite explorar la evolución de una clase de cuerpos. Por otro lado, los objetos con masa inferior tenderían a clasificarse según su origen. Si se formaron a partir de una nube de gas son subenanas marrones (es decir, protoestrellas), en tanto que si surgieron a partir de un sistema solar se considerarán como planetas.

Quizá algún día nuestras sondas puedan alcanzar cuerpos tan lejanos y, mediante el análisis de su composición y estructura, podremos determinar sin margen de incertidumbre cómo se han de clasificar. Mientras tanto, nos centraremos en el descubrimiento, identificación y clasificación provisional. Y para ello, nada mejor que describir las características básicas de los cuerpos que tradicionalmente hemos denominado planetas, así como su formación y evolución. Porque, antes que nada, lo que debemos saber es qué estamos buscando.

La vida de los planetas

Durante décadas los astrofísicos han elaborado modelos y teorías para explicar la formación y desarrollo de nuestro sistema solar. Sabemos que la contracción de una gran nube de gas permitió la formación de una estrella rodeada por varios planetas. Lo que resulta más difícil es predecir su evolución futura.

Todo comenzó en el interior de una nube de gas y polvo de varias decenas de años-luz de diámetro. En su mayor parte estaba compuesta por átomos de hidrógeno, producto de las etapas iniciales de la gran explosión que dio forma a nuestro universo, combinados con sustancias más pesadas que, tras formarse en el interior de las estrellas, fueron posteriormente expulsadas al espacio. Al principio, la densidad en el interior de la nube era demasiado baja para que sus partículas se uniesen por efecto de la gravedad, pero cada vez que esta sufría alguna perturbación a causa de algún suceso externo —como el paso de una estrella o la onda de choque de una explosión de supernova— algún fragmento se comprimía haciéndose más denso. Este proceso de condensación generó una reacción en cadena que provocó que el centro de la nube se hiciera paulatinamente más compacto, que aumentara su concentración de masa y disminuyera su tamaño.

Mientras que ese fragmento colapsaba bajo su propia gravedad tuvieron lugar dos sucesos característicos. El primero fue que la energía cinética de las partículas y, por tanto, la temperatura del fragmento, aumentó. En segundo lugar, conforme la

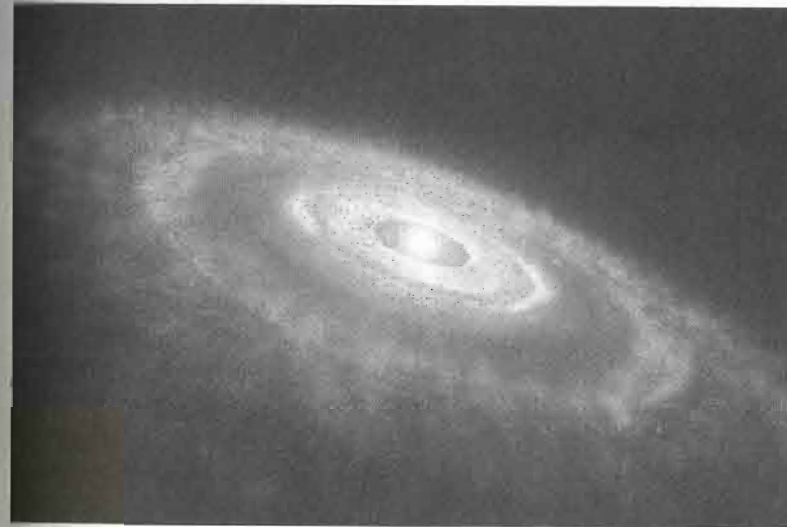
nube se contraía también incrementaba la velocidad de giro sobre su eje como sucede cuando una patinadora aumenta su velocidad de rotación si recoge sus brazos junto al cuerpo. El resultado fue la formación de un núcleo denso rodeado por un disco de material en un plano perpendicular al del eje de rotación del sistema.

Conforme aumentaban la temperatura y presión en el interior de la nube, los átomos de hidrógeno estaban cada vez más cerca moviéndose a mayor velocidad. Las colisiones entre ellos se hicieron tan intensas que, en ocasiones, eran capaces de vencer las fuerzas electrostáticas entre los núcleos atómicos. Así dio comienzo la reacción termonuclear del hidrógeno en el núcleo de la nube. La energía resultante de este proceso aumentó aún más la temperatura y la presión del gas en el interior, hasta que la fuerza generada igualó la fuerza gravitatoria. Así, nació una nueva estrella, la cual contenía más del 99% de la masa de todo el sistema estelar; el resto se distribuyó en un disco de gas y polvo, llamado *disco protoplanetario*, como el que se aprecia en la imagen inferior de la página contigua.

HA NACIDO UN PLANETA

En un principio, la gravedad no fue lo bastante intensa para que el contenido del disco se condensase, pero cuando este empezó a radiar energía, su temperatura disminuyó, propiciando la formación de pequeñas partículas por condensación. Algunas de estas partículas se unieron entre sí, formando fragmentos que, rápidamente, atrajeron más material. El proceso, llamado *acreción*, dio lugar a una gran cantidad de planetesimales de pocos kilómetros de tamaño y, finalmente, a los planetas.

Se estima que la aparición de los planetesimales tardó un par de millones de años, lo que, a escala astronómica, significa un suspiro; la génesis de los planetas llevó algo más, entre diez y cien millones de años. Al final de este proceso, casi toda la masa del sistema estelar se concentró en el Sol y los planetas; el resto del gas y polvo fue expulsado por el viento solar, y solamente



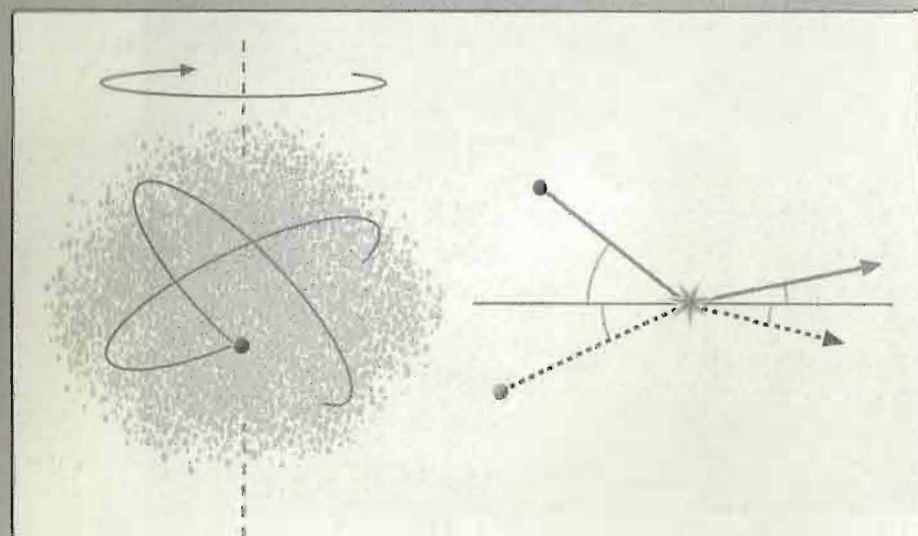
Arriba, la nebulosa de Orión, lugar en el que se está produciendo el nacimiento de estrellas y planetas a partir de nubes de gas y polvo. La recreación artística de la imagen inferior muestra una estrella joven rodeada por un disco protoplanetario en el que se están formando planetas. Las estrellas que alojan planetas destruyen su litio mucho más eficazmente que aquellas que no los tienen, lo que constituye una señal que permite localizar más fácilmente estrellas que formen parte de un sistema solar.

¿POR QUÉ LOS DISCOS PLANETARIOS SON PLANOS?

Según las teorías actuales, una gran nube de gas se condensó para formar el Sol. Parte de esa nube se convirtió en un disco, y de este fueron formándose los planetas. Pero ¿por qué un disco? El motivo tiene que ver con la mecánica orbital. Mientras que la nube de gas gira en torno a un eje, las partículas individuales adoptan órbitas en torno al centro de masas, un punto representativo donde, a efectos de hacer cálculos de gravedad, se supone concentrada toda la masa del sistema. Las órbitas trazadas por las partículas se cortan unas a otras, y los choques subsiguientes entre ellas irán cambiando sus trayectorias.

Choques con distintos grados de inelasticidad

Pongamos que tenemos dos partículas de igual masa y velocidad que giran en órbitas diferentes, pero con igual distancia al centro de masas y con la misma inclinación respecto al plano orbital o plano perpendicular al eje de giro. En algún momento ambas pasarán tan cerca que chocarán entre sí. Si la colisión es perfectamente inelástica, las dos acabarán pegadas y, de acuerdo con la ley de conservación del momento lineal, su nueva órbita será perpendicular al eje de giro, es decir, paralela al plano orbital. En general, si nos referimos a partículas con distinta masa, velocidad e inclinación orbital y choque parcialmente inelástico, la energía cinética de las partículas y, por tanto, su velocidad, disminuirán tras el choque. En particular, la componente

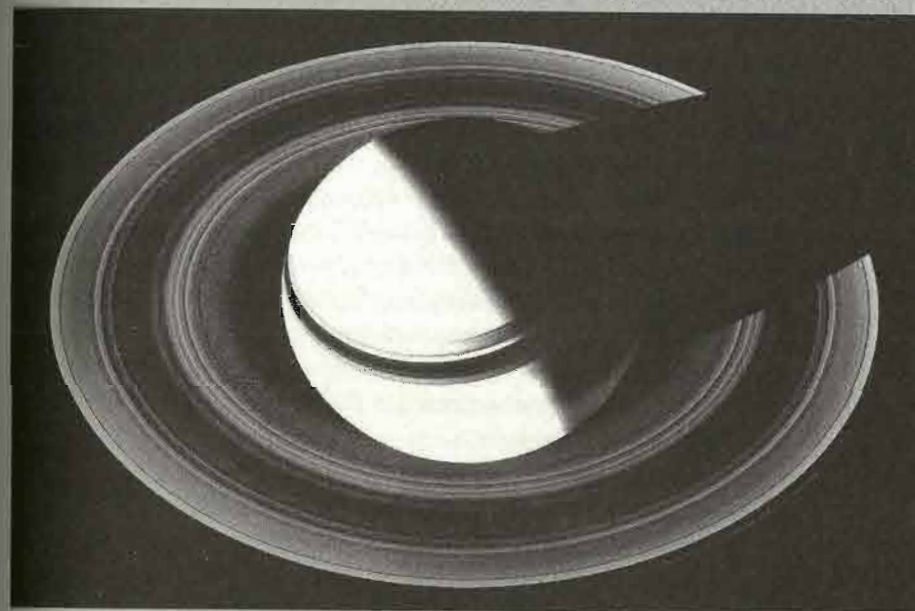


Choque de partículas en una nube de polvo. Después de la colisión, los ángulos de las órbitas con el plano ecuatorial decrecen.

de velocidad paralela al eje de giro se hará más pequeña y, como consecuencia, la órbita de las partículas tenderá a cambiar, formando ángulos más pequeños con el plano orbital, como muestra la figura. De ese modo, las partículas de la nube tenderán a concentrarse en ese plano orbital formando un disco. Los planetas, resultado de la concentración de dichas partículas, tenderán a tener sus órbitas en dicho plano que, en nuestro sistema solar, recibe el nombre de «plano de la eclíptica». Se han detectado discos planetarios en torno a diversos sistemas estelares.

Fenómenos que generan bellas formas anilladas

Los anillos de Saturno, compuestos por miríadas de pequeñas partículas, se crearon de manera similar, pero su génesis fue más compleja. Al efecto de las colisiones se añadió la forma no esférica del planeta, cuyo efecto gravitatorio tendió a agrupar las partículas en un plano. Al contrario que la nube protoplanetaria que formó el sistema solar, estos anillos no se colapsan para formar satélites. ¿El motivo? La existencia de intensas fuerzas de marea provenientes del planeta impiden la formación de cuerpos grandes a partir del material de los anillos. En cambio, las perturbaciones gravitacionales de los satélites de Saturno se combinan para crear una bella estructura de millares de anillos. Pero no solo Saturno los luce: también han sido hallados otros, de menor tamaño, en torno a Júpiter, Urano y Neptuno.



Saturno y su sistema de anillos. Se trata de un mosaico de 36 imágenes tomadas por la nave Cassini.

quedaron algunos cuerpos rocosos o helados como testigos de la formación del sistema planetario.

Los planetas recién formados eran esferas de metal y silicatos en estado líquido, fruto del calor generado por elementos radiactivos y del bombardeo de otros cuerpos. Los materiales comenzaron a diferenciarse dentro del planeta: los más densos, como el hierro y el níquel, se hundieron y se acumularon en el núcleo, en tanto que los más ligeros (silicatos, óxido de titanio y calcio) formaron las capas exteriores. Los materiales volátiles (compuestos de hielo, por ejemplo) se concentraron a mayor distancia de la estrella y fueron capturados por los planetas rocosos que se formaron allí; cuando la masa de estos creció unas diez veces por encima de la masa terrestre, su atracción gravitacional permitió capturar los elementos ligeros como el hidrógeno y el helio. Como resultado, nuestro sistema solar se compone de pequeños planetas rocosos en el interior (desde Mercurio a Marte) y gigantes gaseosos en el exterior (de Júpiter a Neptuno). Mientras que en los planetas rocosos pequeños la superficie es una corteza sólida de algunas decenas de kilómetros de grosor, los gigantes gaseosos cuentan con un grueso sistema de capas formadas por hielo, hidrógeno metálico y gaseoso.

La existencia de atmósfera depende de las características particulares del planeta. Los planetas con masas pequeñas son incapaces de retener las partículas gaseosas y acaban convertidos en cuerpos sin atmósfera, como Mercurio o la Luna; otros pueden retener atmósferas apreciables, como la Tierra o Venus, pero suelen carecer de hidrógeno y helio. En los gigantes gaseosos las atmósferas se componen de hidrógeno, helio, amoníaco, metano y otros compuestos.

Cualquiera que sea el mecanismo preciso de formación, el resultado es que el disco protoplanetario acaba condensándose, lo que conduce a la formación de todo un conjunto de planetas. La siguiente cuestión a plantearse es la duración de un sistema planetario. ¿Durará un millón de años o tan solo mil? Y ¿cuáles son las características que hacen de un planeta en órbita un sistema duradero?

UN BAILE PLANETARIO

Acostumbrados a la física de instituto, tendemos a suponer que un planeta permanecerá en su órbita al menos hasta que su estrella explote y lo engulla, si es que algún día lo hace. La ley de Newton de gravitación universal nos describe el tipo de órbita de un cuerpo atraído gravitatoriamente por otro. En teoría, el planeta seguiría una órbita elíptica, siempre en el mismo plano, y permanecería así hasta la consumación de los tiempos. Ese resultado depende de una serie de simplificaciones, como que el planeta tenga una masa despreciable con respecto a la estrella, que ambos cuerpos sean rígidos y que no exista ninguna otra masa en nuestro universo.

Por supuesto, las condiciones reales son distintas, y el resultado será crucial en las estimaciones de la estabilidad a largo plazo de un sistema planetario. Para empezar, las ecuaciones de Newton para el campo gravitatorio son simples, efectivas y funcionan bien en primera aproximación, pero no incluyen efectos relativistas. Cuando estos se toman en consideración aparece el fenómeno conocido como precesión, según el cual el periastro (punto de mayor cercanía de un planeta a su estrella) va desplazándose con el tiempo. La precesión del perihelio de Mercurio fue en su momento uno de los factores determinantes para aceptar la teoría relativista de Einstein, y tiene un valor muy pequeño aunque medible.

Más problemática resulta la suposición de un cuerpo absolutamente indeformable. Pongamos como ejemplo a nuestra propia Tierra. La zona diurna, más cercana al Sol, sufre una atracción gravitatoria superior a la de la zona nocturna, algo más alejada. Los océanos, que forman una capa deformable sobre la superficie sólida, sufren los efectos de esta diferencia de fuerzas, y el resultado es la aparición de las mareas: el nivel del mar sube y baja de acuerdo con la posición del Sol y, sobre todo, de la Luna. El efecto de marea actúa también sobre las capas del interior del planeta.

Como consecuencia de las fuerzas de marea, la Tierra sufre un proceso de estiramiento y relajamiento que disipa parte de su energía cinética de rotación y la hace girar más lentamente.

El periodo de rotación de un planeta irá disminuyendo hasta que acaba por igualar al periodo de traslación alrededor del Sol. Eso, en astronomía, se denomina *rotación sincrona* (o sincrónica), y se alcanza debido a un proceso conocido como «acoplamiento de marea», por el cual una de las caras de un objeto astronómico

Ahora que suponemos que cada una de esas estrellas es, probablemente, el centro de un sistema solar más grande que el nuestro, no podemos pensar en serio que somos las únicas mentes del universo.

PERCIVAL LOWELL

apunta a otro más grande de forma fija. La Luna es un buen ejemplo de acoplamiento de marea. Sus periodos de rotación y de traslación son iguales, y por eso siempre nos presenta la misma cara. Hay otros ejemplos de ello en nuestro sistema solar, como los satélites de Marte y algunos de los de Júpiter, Saturno y Urano. En casos extremos, las fuerzas de marea pueden llegar a ser lo bastante intensas para destruir el cuerpo sobre el que actúan. Eso sucede cuando este orbita a una distancia inferior al llamado *límite de Roche*, que es precisamente la distancia mínima que puede mantener un objeto respecto al cual orbita. Un bello ejemplo que resulta de no romper ese límite es, en nuestro sistema planetario, el conjunto de anillos de Saturno.

Conforme transcurre el proceso que lleva al acoplamiento de marea, el cuerpo que orbita irá reduciendo su velocidad de rotación. Se pierde así una cantidad llamada momento angular (una medida de la cantidad de movimiento de rotación de un sistema). Ese momento angular es transferido a la órbita del cuerpo. Como consecuencia de ello, para que el cuerpo que orbita gire más despacio sobre su eje, el radio de su órbita debe aumentar. Es decir: se aleja del cuerpo alrededor del cual orbita. Ciertamente, ya se ha comprobado que eso mismo ya ha sucedido en la historia del sistema Tierra-Luna. Algunas formaciones de rocas antiguas indican que hace 2500 millones de años la Luna se encontraba un 10% más cerca de la Tierra que en el presente; entonces un mes lunar duraba 31,7 días. Hoy, se ha acortado hasta los 28,5.

Aunque el proceso de acoplamiento de marea ha terminado para la Luna, continúa vigente para la Tierra. Las fuerzas de ma-

rea sobre nuestro planeta están disminuyendo su velocidad de rotación, haciendo que cada año el periodo de rotación de nuestro planeta aumente en 0,000016 segundos. Como consecuencia de la ley de conservación del momento angular, la Luna sigue alejándose de la Tierra unos 3,8 metros por siglo.

Incluso en ausencia de satélites, un planeta sufrirá fuerzas de marea debidas a su estrella. El proceso de acoplamiento de marea irá cambiando lentamente la órbita del planeta, alejándolo de su sol y ralentizando su propia rotación.

Cuando un sistema planetario contiene más de dos cuerpos, el estudio de sus movimientos se hace inabordable, ya que no hay una solución analítica al movimiento; es decir, no tenemos una ecuación que nos diga dónde se encontrará cada uno de los cuerpos en un momento dado del pasado o del futuro. Es el llamado *problema de los N-cuerpos* (donde *N*, el número de cuerpos en interacción, es superior a dos). En tal caso no hay forma sencilla de saber cuál será la evolución futura del sistema, si bien hay algunos rasgos que resultan llamativos. Uno de ellos es la llamada «resonancia orbital», que sucede cuando los periodos orbitales de dos cuerpos guardan relaciones numéricas sencillas. Cuando eso tiene lugar, las interacciones gravitacionales entre ambos aumentan con el tiempo, de modo similar a lo que sucede cuando se empuja un columpio a intervalos regulares, lo que hace que este suba cada vez más. Un ejemplo es el de Neptuno y Plutón, cuyos periodos de traslación cumplen la relación 2:3 (en el tiempo que Neptuno da tres vueltas alrededor del Sol, Plutón da dos).

En ocasiones, el efecto resonante conduce a la inestabilidad y tiende a alterar las órbitas de los cuerpos, como en el caso de Saturno, donde las resonancias inestables tienden a crear huecos en su hermoso sistema de anillos. En otros casos, la resonancia tiende a estabilizar las órbitas, como en el caso de los satélites Ío, Europa y Ganímedes, que mantienen una resonancia con relación de periodos 1:2:4 en sus movimientos alrededor de Júpiter. Sistemas como el cinturón de asteroides o el de Kuiper muestran una estructura definida por las resonancias con otros planetas, y se cree que en el pasado ayudaron a formar el sistema solar tal y como lo conocemos ahora.

Dado que no es posible obtener una solución exacta al movimiento de N cuerpos, lo cierto es que no hay garantías de que una órbita planetaria sea estable durante miles de millones de años. Es perfectamente posible que un planeta llegue a ser expulsado de su sistema planetario, convirtiéndose en un vagabundo galáctico, o bien que su órbita cambie radicalmente.

EL (LEJANO) FIN DE LA TIERRA

El futuro de un planeta está, en última instancia, ligado al de su estrella, y más concretamente, a la masa de esa estrella. Una estrella de gran masa agotará su combustible nuclear con rapidez, ya que este debe proporcionar una gran presión de radiación para contrarrestar la fuerza gravitatoria. Cuando se agote el hidrógeno, la alta temperatura de su núcleo permitirá iniciar otras reacciones de fusión basadas en elementos más pesados, como el helio, carbono, oxígeno, neón, magnesio, el silicio... o el hierro, donde terminará la sucesión, puesto que a partir de ese momento, no podrán producirse nuevos procesos de fusión que den elementos más pesados y, al mismo tiempo, energía. La fusión se detendrá, y ya no habrá nada que evite que la estrella colapse por su propio peso. Las capas exteriores, que pueden extenderse a millones de kilómetros, comenzarán a caer hacia el núcleo, rebotando hacia el exterior, lo que generará cantidades extraordinarias de energía. Durante unos pocos días, la estrella brillará más que toda su galaxia, convertida en una supernova.

Tras la explosión, los restos de la estrella se colapsarán en un objeto que, en esencia, es como un gigantesco núcleo atómico y que se denomina «estrella de neutrones». Abarca apenas una docena de kilómetros pero tiene tanta masa como una estrella. Si es lo bastante masiva, incluso una estrella de neutrones colapsa bajo su peso. De ese colapso resulta un objeto de tamaño minúsculo cuya fuerza gravitatoria es tan, tan intensa, que incluso la luz sería incapaz de abandonar sus cercanías. ¿Lo adivinan? Sí, se trata de un agujero negro.

Resulta difícil imaginar que un planeta pueda formarse en entorno tan hostil, donde no solamente resultaría destruido tras la explosión de la supernova, sino que la corta vida de su estrella impediría su formación. Pero... ¿y si la estrella fuese menos masiva y durase más? Nuestro Sol es un buen ejemplo de ello. Tras una infancia loca pero breve siendo una estrella de tipo T Tauri, pasó a la secuencia principal y, como tal, ha estado brillando de forma ininterrumpida desde hace 4600 millones de años, permitiendo la formación de un sistema planetario en el que se incluye la Tierra.

Pero conforme pasa el tiempo, el hidrógeno que fusiona el Sol se va convirtiendo en helio, y puesto que este es más pesado, tiende a hundirse hacia el centro. Cuando el peso de la estrella comienza a hacerse sentir sobre el núcleo de helio, se compensa con una mayor fusión de hidrógeno. Con el tiempo, esto produce un aumento de la luminosidad que no es baladí. En los últimos 4500 millones de años, se estima que el brillo del Sol ha crecido un 30% y dentro de 1000 millones de años, todo apunta a que habrá aumentado un 10% más.

Para entonces, la temperatura de la Tierra superará los 50 °C de media y nuestro planeta dejará de estar en la zona de habitabilidad del sistema solar. Pasados 3500 millones de años los océanos hervirán, los casquetes polares habrán desaparecido y el agua escapará al espacio en forma de vapor. Sin embargo, la Tierra seguirá girando alrededor del Sol, y este continuará brillando.

Dentro de unos 5500 millones de años, el hidrógeno que hay en el núcleo del Sol se habrá convertido en helio, y al frenarse la reacción de fusión, el Sol comenzará su colapso gravitatorio, lo que elevará la temperatura del núcleo hasta el punto de que en este comenzará un nuevo proceso de fusión termonuclear que utilizará el helio como combustible. El Sol saldrá entonces de la secuencia principal y se convertirá en una gigante roja, más luminosa pero de menor temperatura superficial. Crecerá tanto

En cinco mil millones de años, el Sol se expandirá y engullirá nuestra órbita, al tiempo que la brasa carbonizada que un día fue la Tierra se vaporizará. Que tengan un buen día.

NEIL DEGRASSE TYSON

que se extenderá más allá de las órbitas de Mercurio y Venus. Posiblemente llegue hasta la Tierra (persisten las dudas sobre los límites exactos de su expansión), o quizá se limite a convertir su superficie en un auténtico infierno.

Cuando también se agote el helio, volverá a repetirse el mismo proceso de colapso: las capas exteriores caerán hacia el núcleo, la temperatura aumentará y dará comienzo un nuevo proceso de fusión que convertirá el helio en carbono. Eso será el final, ya que el Sol no podrá fusionar elementos más pesados. En las etapas finales se volverá inestable y las capas exteriores serán expulsadas al espacio, formando una hermosa nebulosa planetaria. El resto de la estrella, con una masa aproximadamente la mitad de la que tiene ahora, se concentrará en un objeto del tamaño de la Tierra y formará lo que se conoce como una enana blanca.

Para entonces el Sol llevará existiendo algo más de 10 000 millones de años, y todavía tendrá por delante la mayor parte de su vida. Agotado su combustible nuclear, el colapso gravitatorio se evitará gracias a la contención ejercida por los electrones, un fenómeno conocido como «presión de degeneración». A nuestra estrella solamente le quedará ir liberando su calor residual, como si de un ascua inmensa se tratase, en un proceso que puede durar billones de años.

En la clasificación más utilizada en astronomía, las diferentes clases de estrellas se enumeran de las más calientes a las más frías, y se utilizan las siguientes letras para agruparlas: O, B, A, F, G, K, M. Las estrellas de clase M, las menos masivas, seguirán un proceso similar pero mucho más lento, puesto que su periodo de fusión termonuclear puede durar cientos de miles de millones de años. Esa durabilidad, unida al hecho de que forman la mayoría de las estrellas conocidas, hace que sean buenos candidatos para albergar sistemas planetarios estables. Su brillo será bajo en luz visible, pero pueden detectarse mediante observación en el infrarrojo.

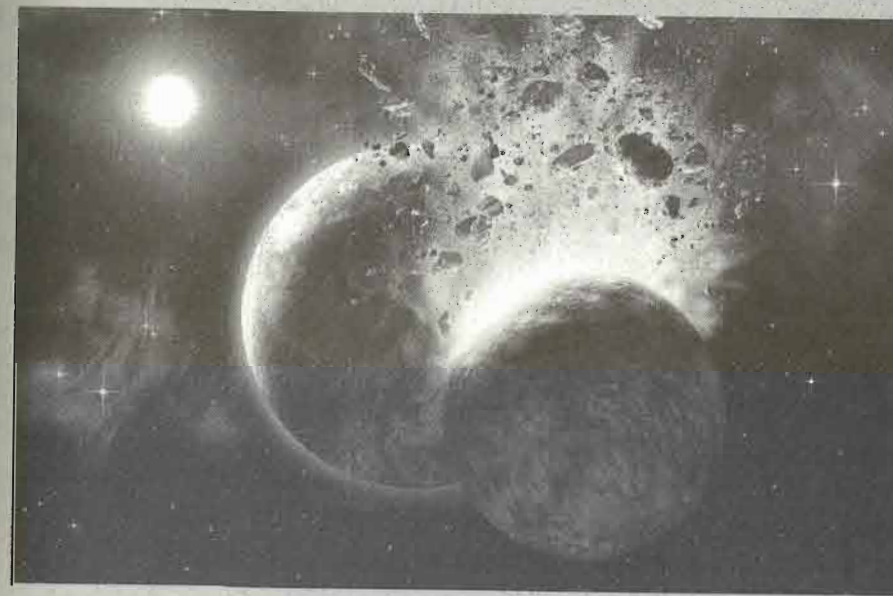
La evolución de un sistema solar fue, hasta finales del siglo xx, una tarea difícil de estudiar, entre otros motivos porque solamente teníamos nuestro propio vecindario solar como objeto de estudio. Pero para mejorar nuestros conocimientos sobre la formación y

INCERTIDUMBRE Y CAOS PLANETARIO

Es lógico afirmar que, si arrojamos un objeto al suelo, caerá en un punto determinado, y que si lo volvemos a soltar desde una posición inicial ligeramente diferente, caerá casi en el mismo lugar que antes. Eso se debe a que la caída de un objeto apenas varía tras una leve modificación de las condiciones iniciales. Pero existen sistemas en los que una ligera variación en las condiciones iniciales sí que produce grandes cambios al cabo del tiempo; son los denominados *sistemas caóticos*. Un ejemplo de sistema caótico es la predicción meteorológica: dos predicciones que partan de condiciones muy parecidas darán previsiones totalmente diferentes al cabo de unas semanas. De ahí el célebre adagio que afirma que el aleteo de una mariposa en China puede provocar tempestades en Nueva York.

¿Es el sistema solar caótico?

Para averiguarlo se han llevado a cabo diversas simulaciones informáticas que intentan predecir el comportamiento de las órbitas planetarias a escalas de tiempo a millones de años vista. Los resultados indican que, ciertamente, algunos planetas pueden colisionar entre sí, como simula la imagen del choque de Mercurio y Venus, o bien ser expulsados del sistema solar de forma caótica. En cualquier caso, los resultados vienen indicados en términos de probabilidad. Así que la única certeza con relación al futuro de los planetas es que nadie sabe qué sucederá en realidad.



¿Es posible una colisión entre Mercurio y Venus en el futuro? Según la teoría del caos, sí.

evolución de un sistema planetario es necesario observar otros sistemas distintos al nuestro. No hay motivo para creer que no existan, y el descubrimiento de discos protoplanetarios en otras estrellas parece indicar que un sistema de planetas es no solo posible sino probable. Puede que, incluso, sea inevitable.

Pero ¿cómo podemos esperar a investigar un sistema planetario lejano cuando hasta las estrellas cercanas apenas aparecen como una imagen puntual bajo nuestros más potentes telescopios? Bueno, esa era una tarea que se consideraba prácticamente imposible a finales de los años ochenta, pero en la actualidad se ha confirmado ya la existencia de más de dos mil planetas extrasolares. Y es que, a lo largo del proceso, hemos ido rompiendo una barrera técnica tras otra, y así seguimos... avanzando.

En modo de detección

Hace apenas veinticinco años encontrar un planeta orbitando alrededor de una estrella a billones de kilómetros de distancia era misión imposible. Hoy, gracias a un conjunto de avances técnicos y al despliegue de observatorios espaciales, ya se han descubierto dos millares de exoplanetas. Y la cifra sigue creciendo.

La exploración del sistema solar ha avanzado de acuerdo con los avances técnicos. Si en su tiempo Neptuno y Plutón fueron encontrados mirando a través del telescopio, los descubrimientos actuales requieren del uso de telescopios automatizados que almacenan imágenes digitales, las cuales son analizadas por programas informáticos especiales. Los satélites de los planetas gaseosos gigantes, observados por vez primera por Galileo Galilei, son explorados por sondas espaciales que transmiten información acerca de su dinámica orbital, composición, geografía y atmósfera.

Descubrir cuerpos en nuestro sistema solar, que es, por así decirlo, «nuestro patio de juegos», es tarea fácil. Hacerlo más allá, en las inmediaciones de otras estrellas, es harina de otro costal. El problema principal es la distancia. Cuando en 1990 la sonda Voyager 1 dirigió su cámara hacia el interior del sistema solar para realizar una última serie de fotografías, la Tierra y todo lo que contiene quedó reducido a una minúscula mota de color azul pálido. Teniendo en cuenta que la Voyager 1 se encontraba a seis mil millones de kilómetros, ¿qué posibilidad tendría de detectar un planeta en la estrella más cercana, situada siete mil veces más lejos?

Cualquier intento por descubrir planetas en otras estrellas tropieza con el problema de esa descomunal lejanía. Las estrellas se hallan tan sumamente lejos que, incluso con los mejores telescopios, lo más que podemos obtener de la mayoría de ellas es una imagen borrosa de un punto de luz. Si intentamos observarlas con más detalle nos encontramos con un segundo problema: el brillo de la propia estrella supera con mucho al de cualquier planeta, mucho más pequeño y menos masivo. En nuestro propio sistema planetario, sin ir más lejos, el brillo del Sol supera en mil millones de veces al del planeta Júpiter.

Pero a pesar de todas las dificultades, la búsqueda de planetas extrasolares dio comienzo sin dilación, y mediante las técnicas más eficaces se empezaron a examinar las estrellas en busca de variaciones minúsculas en su velocidad, posición o brillo. El secreto del éxito ha residido en el avance de los medios técnicos, que ha permitido superar barreras consideradas antaño insalvables, así como en el descubrimiento de nuevos métodos de detección. No es que alguno de ellos sea netamente superior a otro, sino que cada uno de ellos tiene sus propias ventajas y limitaciones; por ello, lo más provechoso es usarlos todos.

VELOCIDAD RADIAL

Una de las cosas que los astrónomos del siglo XIX pudieron llevar a cabo es la determinación de la velocidad de las estrellas. La medición de sus posiciones en distintos intervalos de tiempo permite obtener la velocidad aparente a lo largo de la bóveda celeste. Lo que todavía faltaba entonces era obtener la llamada *velocidad radial*, la velocidad de un objeto a lo largo de la línea visual del observador (figura 1), es decir, la que apunta hacia la Tierra. Si una estrella se dirigiese directamente hacia nuestro planeta no podríamos saberlo, ya que aparentemente ocupa el mismo lugar en el cielo.

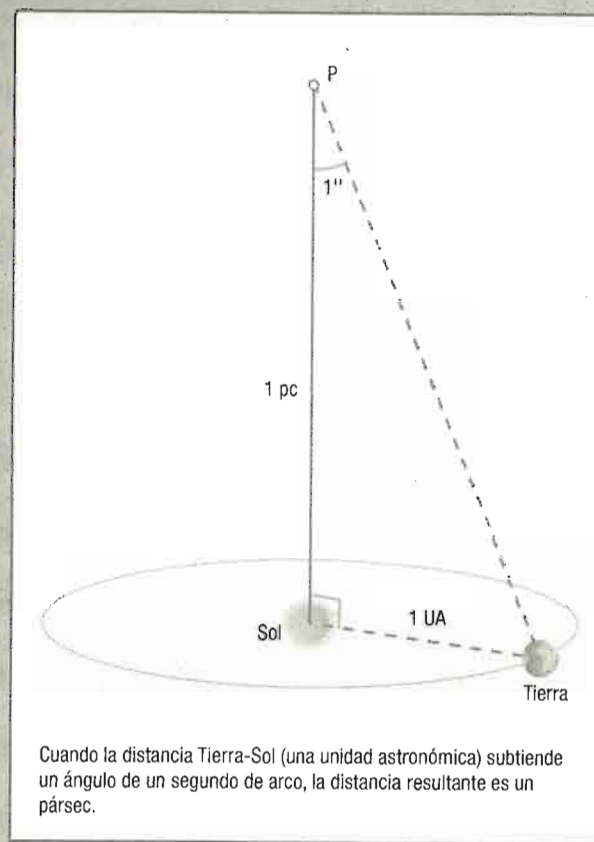
Fue a finales del siglo XIX cuando el astrónomo alemán Hermann Carl Vogel (1841-1907) consiguió medir esa componente radial de la velocidad. Para ello usó el efecto Doppler, llamado

UNIDADES PARA MEDIR EL UNIVERSO

Los científicos utilizan para sus medidas las unidades del Sistema Internacional (SI), como el metro (distancia), el kilogramo (masa) y el segundo (tiempo), pero a veces resulta preferible utilizar otras unidades. Tal es el caso de la astrofísica, donde las masas y las distancias son enormes y deben expresarse con muchos dígitos. Una de esas unidades es la llamada unidad astronómica (UA), que es la distancia promedio Tierra-Sol, unos 149,6 millones de kilómetros. Las distancias entre estrellas son tan grandes que se suele utilizar el año-luz —la distancia recorrida por la luz en un año—, que equivale a unos 9,46 billones de kilómetros o a 63241 UA. También se utiliza el pársec (ilustrado en la figura), que es la distancia a la que el radio de la órbita terrestre subtende un ángulo de un segundo de arco, y que equivale a unos 3,26 años-luz.

Por comparación

Las masas de los cuerpos estelares se estiman comparándolas con la de nuestro Sol. Por ejemplo, la estrella Mu Arae (el nombre oficial desde diciembre de 2015 es estrella Cervantes) tiene una masa estimada de 1,08 veces la solar. Para objetos de tamaño planetario, resulta más cómodo usar como referencia la masa de Júpiter o la de la Tierra. En cuanto a las unidades de tiempo, sirven las habituales en otros casos: horas, días, años terrestres. Los estromóviles que operan en Marte, como el Curiosity, hicieron necesario el uso de un nuevo término para denominar al día marciano de forma que no se confundiera con el día terrestre. Se le llamó «sol» y equivale a unas 24,6 horas terrestres.



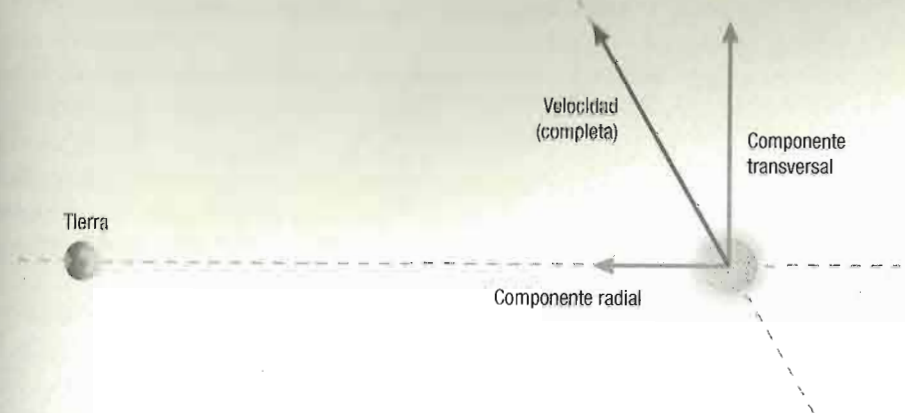
Cuando la distancia Tierra-Sol (una unidad astronómica) subtende un ángulo de un segundo de arco, la distancia resultante es un pársec.

así por el físico austriaco Christian Andreas Doppler (1803-1853). Este efecto describe la variación de la longitud de onda que emite o recibe un objeto en movimiento y permite determinar si una fuente de luz está acercándose o alejándose de nosotros. Durante la primera mitad del siglo xx, los astrónomos se apoyaron en ese efecto para identificar el movimiento preciso de las estrellas, y hacia la década de 1950 ya se había catalogado la trayectoria de más de 15000 estrellas. Fue entonces cuando el astrónomo estadounidense de origen ruso Otto Struve (1897-1963) propuso usarlo para buscar planetas extrasolares.

Supongamos un caso sencillo en el que una estrella, su planeta y la Tierra se encuentran en el mismo plano. Durante parte de la órbita del planeta, la fuerza gravitatoria de este desplaza la estrella hacia nosotros (figura 2). En ese momento, el efecto Doppler se manifiesta haciendo que la luz de la estrella se vuelva algo más azul. Mientras, en el lado opuesto de la órbita sucederá lo contrario: la estrella se aleja y su luz se dirige hacia el rojo. Midiendo cuidadosamente la luz recibida se puede comprobar que la estrella se acerca y se aleja periódicamente de nosotros, lo que prueba que tiene un objeto girando a su alrededor a intervalos regulares.

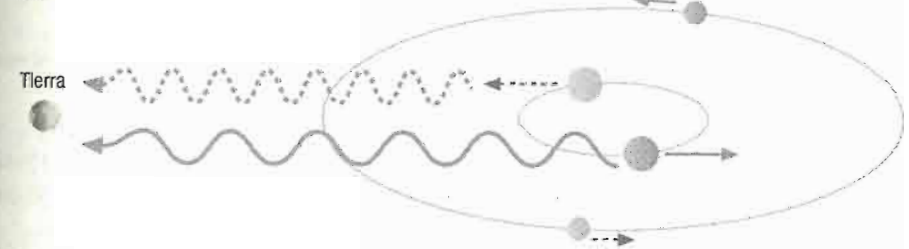
En 1899 el propio Vogel comprobó la validez del método al demostrar que la estrella Spica es en realidad un sistema binario. Su estrella compañera era demasiado débil para verse mediante un telescopio, pero el análisis espectroscópico demostró la existencia de dos estrellas más allá de toda duda. El principio es el mismo para una estrella con planetas, sencillo en teoría pero difícil de llevar a cabo en la práctica, porque la masa de un planeta es mucho menor que la de una estrella y, en consecuencia, el efecto será más pequeño. Un planeta con la masa de Júpiter que orbitase una estrella como nuestro Sol a una distancia de tres millones de kilómetros (cincuenta veces más cerca que la Tierra) produciría una variación en la velocidad de la estrella de unos 200 m/s, algo menor que la velocidad de un avión comercial. En tiempos de Struve, el problema consistía en que las mejores medidas de las velocidades estelares efectuadas conllevaban un error experimental de unos 750 m/s, casi cuatro veces más.

FIG. 1



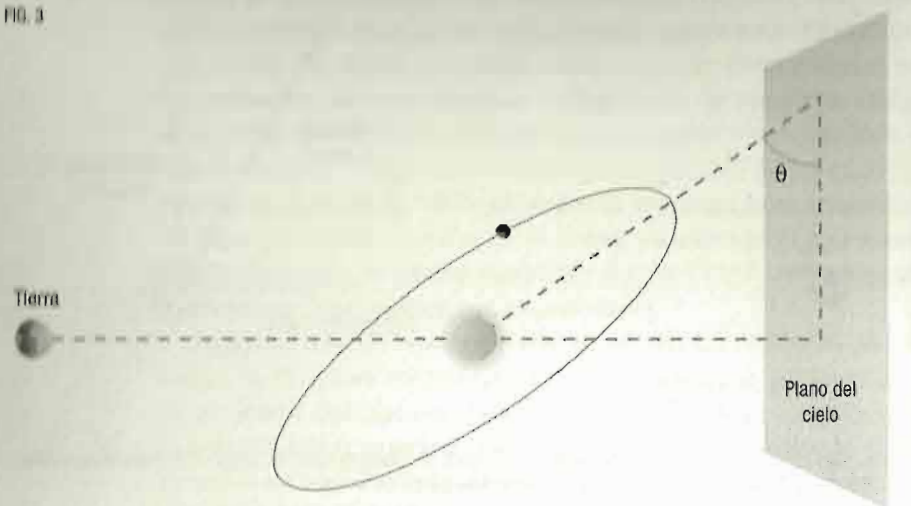
Velocidad de una estrella y sus componentes. La llamada componente radial se dirige en la dirección que lleva a la Tierra; la componente transversal es perpendicular a esta.

FIG. 2



Método de velocidad radial. La estrella se acerca y aleja periódicamente de nosotros en virtud de los tirones gravitatorios del planeta. La luz tiende a desplazarse hacia el rojo (línea continua) cuando la fuente se aleja de nosotros, y hacia el azul (línea punteada) cuando se acerca.

Una segunda limitación viene impuesta por la geometría. La técnica del efecto Doppler tiene su máxima efectividad cuando el plano que contiene la órbita del planeta aparece de perfil con respecto al observador (figura 3). En el extremo opuesto, una órbita que fuese perpendicular a nuestra dirección de visión no podría detectarse, puesto que el planeta no tiraría de su estrella en nuestra dirección. En general, una observación mediante la técnica de la velocidad radial no permite obtener la masa M del



La técnica de velocidad radial depende de la inclinación en la órbita del sistema estelar observado, algo que desconocemos de antemano y limita nuestro conocimiento sobre la masa del planeta.

planeta, sino la cantidad $M_i = M \cdot \sin(\theta)$, donde θ es el ángulo que forma la órbita del planeta con el plano del cielo. A menos que alguna otra técnica de observación permita medir dicho ángulo, no podremos determinar la masa verdadera.

Ahora bien, si suponemos que las órbitas de los planetas están inclinadas de forma aleatoria, la situación no es tan mala, porque entonces el valor promedio de la función $\sin(\theta)$ es alto. Es posible que, al fijar la atención en un sistema planetario particular, resulte que su ángulo θ tenga un valor pequeño (correspondiente a una órbita casi en el plano del cielo), lo que podría enmascarar la presencia de un planeta; pero la probabilidad de que eso suceda es pequeña.

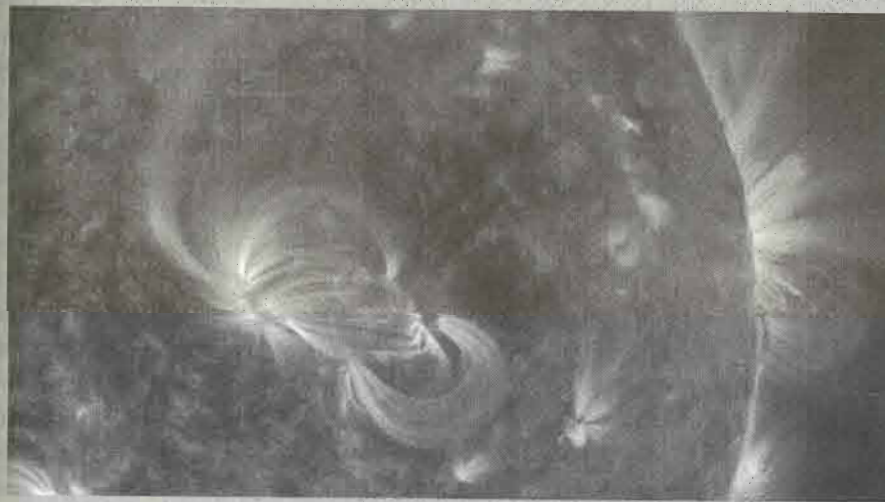
Existe una serie adicional de correcciones que hay que efectuar antes de que la técnica de velocidad radial sea capaz de detectar exoplanetas. Una estrella dista mucho de ser un cuerpo sólido y homogéneo. Existen movimientos de vaivén de la envoltura superior de la estrella. Su superficie está llena de pe-

EL EFECTO DOPPLER: LA INFORMACIÓN DE UN ESPECTRO

Cuando un haz de luz atraviesa un prisma de vidrio o rebota en una gota de agua, el resultado es un hermoso arcoiris de colores que los físicos denominan «espectro». Gracias al desarrollo de técnicas para su análisis, la denominada espectroscopia, se puede obtener información sobre la fuente emisora de la luz. Cuando esta se aleja del observador, la luz se desplaza hacia colores más rojizos, y cuando se acerca, hacia los azules. Midiendo ese desplazamiento se puede determinar la velocidad de la fuente. Este fenómeno, conocido como efecto Doppler, sirve también para estudiar otro tipo de ondas aparte de las luminosas; es la utilizada por los radares policiales para hallar la velocidad de los coches, y también es responsable de que el tono de la sirena de una ambulancia se haga más grave cuando se aleja de nosotros.

Conseguir lo imposible

El estudio de la intensidad máxima de emisión proporciona la temperatura del objeto, y permite incluso deducir su composición química, ya que cada sustancia emite en longitudes de onda concretas, lo que crea una especie de «huella dactilar» que permite su identificación. De esa forma, en 1868 se descubrió el elemento químico helio en nuestro Sol. Solo tres décadas antes, el filósofo Auguste Comte había postulado que las investigaciones que no puedan ser reducidas a observaciones visuales nos quedan negadas. Entre otras cosas, indicó que nunca podríamos, por ningún medio, estudiar la composición química de las estrellas ni hallar su temperatura.



El efecto Doppler también es útil para obtener mapas del campo magnético solar y tener un registro completo de la distribución de las estructuras magnéticas de la fotosfera.

queñas células de convección y la actividad magnética puede provocar la aparición de manchas solares. Estos efectos, en su mayor parte, se pueden promediar en el tiempo, pero habrá ocasiones en que podrán enmascarar la influencia de un planeta. También hay que recordar que el efecto Doppler mide la velocidad del planeta respecto al observador, y la Tierra no es un objeto inmóvil.

A pesar de todos los inconvenientes, Struve creyó concebible la posibilidad de que un planeta pudiera ser detectado en determinadas condiciones (masa planetaria elevada y cercanía a la estrella) por medio de técnicas Doppler. Lamentablemente Struve falleció en 1963 sin ver corroborada su hipótesis, pero en los años setenta se efectuaron avances técnicos que permitieron realizar medidas de velocidad más precisas, con un error de apenas 10 metros/segundo. Esa cantidad es aproximadamente igual al efecto que el planeta Júpiter hace sobre nuestro Sol.

Años más tarde, durante la década de 1980, un equipo de astrónomos canadienses midió la velocidad de una veintena de estrellas cercanas. Los datos obtenidos descartaron la existencia de planetas con una masa $M_i = M \cdot \sin(\theta)$ inferiores a 1-3 masas de Júpiter. No detectar nada es aceptable en ciencia, pero a todos los científicos les gusta obtener un resultado positivo. El primer éxito llegó en 1989, año en el que un equipo dirigido por el astrofísico estadounidense David Latham anunció la detección de un objeto de una masa mínima M_i de 11 veces la de Júpiter, orbitando con un periodo de 84 días (similar al del planeta Mercurio) en torno a una estrella conocida con el código HD 114762 y que se encuentra a unos 130 años-luz de nosotros.

Aunque en un principio se tuvo la sospecha de que el nuevo objeto era realmente una estrella enana marrón, medidas posteriores mostraron que el cuerpo tenía masa planetaria, y actualmente se le reconoce como el primer planeta extrasolar descubierto. Quedaba la cuestión de cómo bautizarlo. La Unión Astronómica Internacional tiene ciertas normas para la asignación de los nombres de satélites, estrellas o cometas, pero no había regla alguna sobre exoplanetas. La decisión escogida, que se ha cumplido desde entonces, consiste en bautizar el planeta con

el mismo nombre que la estrella, seguido de una letra minúscula: «b» por el primer planeta, «c» por el segundo y así sucesivamente. De ese modo, el nuevo cuerpo se convirtió oficialmente en el exoplaneta HD 114762 b.

El descubrimiento obligó a reexaminar las teorías relativas a la formación planetaria. Los modelos aceptados hasta entonces predecían que los gigantes gaseosos solamente podían formarse a gran distancia de su estrella y no consideraban posible que pudiesen estar a apenas unos pocos millones de kilómetros. Ahora se acepta la viabilidad del fenómeno llamado migración, según el cual un gigante gaseoso tipo Júpiter puede formarse a gran distancia de su estrella (cientos de millones de kilómetros) y, mediante posteriores interacciones con su disco de polvo estelar protoplanetario, puede ir acercándose a la estrella. Este concepto de migración involucra procesos físicos complejos que a día de hoy aún no se comprenden en su totalidad. Por ejemplo, no está claro todavía por qué Júpiter y Saturno no migraron a una órbita más cercana.

La técnica de velocidad radial demostró su utilidad con el descubrimiento de HD 114762 b, pero la verdadera revolución llegó en la década de los años noventa. En 1993, el observatorio astronómico de la Alta Provenza, en Francia, fue equipado con un nuevo espectrómetro de luz visible llamado ELODIE. Durante un año, los astrofísicos suizos Michel Mayor y Didier Queloz aprovecharon la oportunidad para comenzar una búsqueda de planetas extrasolares en torno a casi 150 estrellas de clase G y K. Una de las candidatas se llamaba 51 Pegasi, una estrella similar a nuestro Sol y distante unos 48 años-luz de nosotros.

Tras cuatro meses de observaciones y cálculos, se hizo evidente que 51 Pegasi tenía acompañante. Las mediciones Doppler mostraron claramente que la estrella se acercaba y alejaba de la Tierra con un periodo de 4,23 días, lo que indicaba la existencia de un planeta con ese periodo orbital. Los datos arrojaron un valor de masa mínima levemente inferior a la mitad de la de

¿La astronomía? Es imposible de entender y estudiarla es una locura.

SÓFOCLES

BAUTIZANDO LAS ESTRELLAS

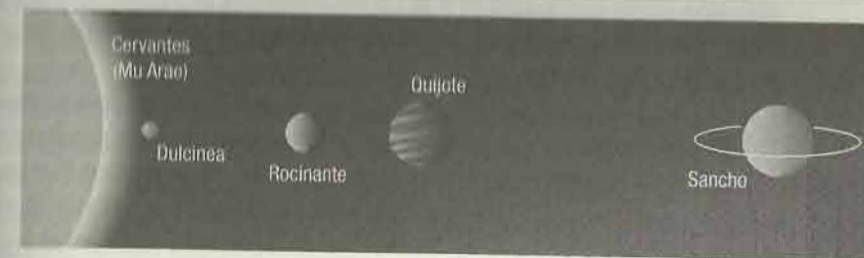
A lo largo de la historia, diferentes civilizaciones han dado nombre a las estrellas de la bóveda celeste. De entre los nombres aceptados, algunos provienen de la tradición grecolatina, como Polaris, Proción, Régulo, Antares o Sirio. Muchos otros fueron ideados por los árabes, que bautizaron estrellas mientras Europa languidecía en una Edad Oscura. En 1603 el astrónomo alemán Johann Mayer publicó su atlas estelar llamado *Uranometria*, según el cual el cielo se dividía en constelaciones, y las estrellas de cada constelación recibían una letra griega según su brillo: la más brillante sería alfa, la segunda, beta, y así sucesivamente. Así, Antares pasó a llamarse Alfa Scorpi.

No hay nombre para tanta estrella

El uso de telescopios hizo que el número de estrellas observables aumentase enormemente, hasta el punto de que ya no hay nombres para todas. Las más afortunadas tienen nombres *ad hoc* según el catálogo en el que aparecen (catálogo Lalande, SAO, HD, Kepler, Corot, etc.). Para las demás, la única distinción es un código numérico que indica sus coordenadas en el firmamento. Existen empresas que, por un módico precio, bautizan una estrella con el nombre que el cliente escoja, pero su propósito no va más allá que el de halagar la propia vanidad (o la del ser querido), ya que esos nombres no son reconocidos oficialmente. Para ello deberían ser validados por la Unión Astronómica Internacional (UAI), el organismo encargado de dar nombre a los objetos celestes.

Se aceptan propuestas

En el verano de 2015 la UAI abrió un concurso para dar nombre a una veintena de sistemas exoplanetarios, tanto de planetas descubiertos como, en algunos casos, de sus estrellas. Se han propuesto todo tipo de nombres basados en la tradición de diversas culturas (de la acacia a la japonesa); pero también hay otras propuestas más modernas, como nombres de científicos (entre ellos, Rosalind, Hipócrates, Galileo, Sagan, Demócrito o Hipatia), escritores de ciencia ficción (como Clarke, Verne, Heinlein o Asimov), personajes de la serie *Juego de Tronos* o nombres como Poltergeist, Ninja o Palmira. En España, el Planetario de Pamplona, la Sociedad Española de Astronomía y el Instituto Cervantes hicieron campaña para que una de esas estrellas, conocida con el nombre de Mu Arae, pasase a llamarse Cervantes. La iniciativa tuvo éxito. Las observaciones realizadas han mostrado que Mu Arae es una estrella subgigante de color amarillo-anaranjado tipo G, distante de la Tierra solamente 50 años-luz y similar en características a nuestro Sol, aunque se estima que tiene el 108 % de la masa del Sol, es un 32 % más grande y 1,7 veces más luminosa. Cervantes tiene no uno, sino cuatro planetas girando a su alrededor. En este sistema el primer planeta descubierto (véase la figura) recibió el nombre de Quijote, un cuerpo con una órbita excéntrica (cómo no) cercana a la de su fiel Rocinante; el masivo Sancho se encuentra a distancia de ellos, mientras que la encantadora Dulcinea orbita muy cerca del corazón de Cervantes. En torno a otra estrella llamada Iota Draconis gira el planeta Hipatia, nombrado así por iniciativa de una asociación de estudiantes de la Universidad Complutense de Madrid.



Sistema Mu Arae, según la propuesta del Planetario de Pamplona, que fue aceptada oficialmente en diciembre de 2015, cuando pasó a llamarse «Sistema Cervantes».



Casa de Cervantes (Alcalá de Henares), con las esculturas de Sancho y don Quijote, dos de sus más ilustres ciudadanos.

Júpiter, y el radio orbital estimado fue de unos ocho millones de kilómetros. Por vez primera se había detectado un planeta con una masa comparable a la de los planetas de nuestro propio sistema solar, y lo más llamativo, en torno a una estrella muy parecida a la nuestra.

El hombre debe elevarse por encima de la Tierra, a la parte superior de la atmósfera y más allá, porque solo así podrá comprender de forma plena el mundo en el que vive.

SÓCRATES

descubierto en ese sistema un total de cuatro planetas, con radios orbitales entre 9 y 380 millones de kilómetros. Esto nos permite confirmar que los planetas extrasolares no son curiosidades que giran en solitario, sino que pueden formar sistemas planetarios similares al nuestro.

Los años siguientes fueron testigos de la detección de un número creciente de planetas extrasolares, fruto de los avances técnicos que se estaban produciendo. Los buscadores de exoplanetas sabían que el éxito era cuestión de precisión, y dedicaron sus esfuerzos para llevar los límites de observación cada vez más lejos. La carrera en pos de la máxima precisión ha dado resultados espectaculares. Cuando Mayor y Queloz descubrieron su planeta alrededor de 51 Pegasi, sus medidas para la velocidad estelar tenían una incertidumbre de 13 m/s. El instrumento ELODIE fue capaz de reducir ese error a 7 m/s, y en 2006 fue reemplazado por un nuevo espectrómetro llamado SOPHIE, que bajó el límite hasta los 3 m/s; cifra que se redujo hasta los 1,3 m/s en observaciones cortas. Los astrofísicos habían logrado medir la velocidad radial de las estrellas con un error comparable a la velocidad de paseo de un ser humano.

Pero tanto ELODIE como SOPHIE adolecían de un problema geográfico: ubicados en el sur de Francia, eran incapaces de

observar las regiones estelares del hemisferio sur. Para paliar esta limitación el observatorio de Ginebra instaló un nuevo instrumento, llamado CORALIE, en un telescopio del Observatorio de La Silla, en Chile. Este, a su vez, fue sustituido en 2003 por HARPS, un espectroscopio de alta precisión capaz de llegar al límite de 1 m/s. Ese límite se consideraba desde hacía años como un desafío experimental, la frontera de lo técnicamente posible, pero no tardó mucho en ser cruzado. HARPS mostró la capacidad de llegar al límite de precisión de 0,5 m/s, llegando incluso a los 0,2 m/s en una observación corta.

Veinte centímetros por segundo. Mil veces menos que lo que Otto Struve consideraba posible en la década de 1950. La caza de planetas extrasolares había adquirido una nueva dimensión. Ya no se trataba tan solo de determinar si había planetas orbitando otras estrellas, sino de comprobar si alguno de esos planetas tiene características similares a las de la Tierra. Los nuevos límites de resolución acercaban cada vez más esa posibilidad.

Al terminar la década de 2000, la masa del planeta más ligero detectado había descendido hasta las cuatro masas terrestres. En 2009, un análisis de la estrella Gliese 581 reveló la existencia de un planeta con una masa de tan solo 1,9 veces la de la Tierra. Finalmente, en 2014 se descubrió el planeta extrasolar más ligero detectado mediante las técnicas de velocidad radial. Se llama Kepler-138 d y tiene una masa prácticamente igual a la terrestre, aunque gira tan cerca de su estrella que su temperatura superficial roza los 160 °C.

La búsqueda de nuevos planetas extrasolares continúa, y el descubrimiento de objetos con masa y radio orbital similar a la de nuestra Tierra exige nuevos avances en las técnicas de detección. La lista de tareas pendientes incluye el estudio de velocidades radiales estelares en el infrarrojo cercano, lo que permitirá ampliar el rango de detección de las estrellas de clase M (las más frecuentes de nuestra galaxia), y el uso de telescopios de mayor apertura con espectroscopios de nueva generación.

Un gemelo del sistema HARPS (llamado HARPS-N) ha sido ya instalado en el Telescopio Nazionale Galileo, de 3,6 m de

apertura, ubicado en la isla canaria de La Palma. En el hemisferio sur, en pleno desierto de Atacama, en Chile, el gran telescopio VLT (*Very Large Telescope*, en realidad cuatro enormes telescopios con una apertura de 8,2 m cada uno), parte del gran Observatorio Europeo del Sur (ESO), será equipado con el espectroscopio de nueva generación ESPRESSO. Se espera que este nuevo instrumento vea la primera luz en 2016 y que consiga romper la barrera de precisión de 0,1 m/s, lo que permitiría finalmente detectar planetas con masa y órbita similares a las de la Tierra.

Pero incluso este gigante palidece en tamaño ante el E-ELT, el Telescopio Europeo Extremadamente Grande, un colosal telescopio que está siendo construido también por el ESO cerca del VLT. Cuando esté terminado, hacia el año 2024, será con mucho el mayor telescopio del mundo, con un espejo de casi 40 m de apertura. Combinado con el espectroscopio de nueva generación CODEX, será capaz de detectar velocidades estelares con una precisión de un centímetro por segundo, aproximadamente la velocidad de un caracol de jardín. Los resultados científicos que se obtendrán hoy solamente podemos imaginarlos.

Un análisis de los parámetros para los exoplanetas descubiertos mediante el método de velocidad radial indica que un grupo de ellos tiene una masa diez veces superior a la de la Tierra, y gira a una distancia diez veces menor; por otro lado, también se ha descubierto un gran número de planetas con masa y distancia orbital similar a la del planeta Júpiter (figura 4). A juzgar por estos datos parecería como si los planetas con masa y órbita similares a la Tierra fuesen escasos.

Con todo, no hay que olvidar que la técnica de velocidad radial es más sensible para planetas con mucha masa y cortos radios de giro, por lo que la muestra obtenida no será representativa. Aun así, ha derivado en una forma de búsqueda con un alto grado de éxito. En 2016, en el momento de escribir estas líneas, el número de planetas descubiertos mediante velocidad radial asciende a 666, lo que representa un 32% del total. No hay duda de que podemos hacerlo mejor y la cifra aumentará rápidamente. Para ello, deberemos jugar a vislumbrar entre las sombras.

LA IMPORTANCIA DE LA APERTURA

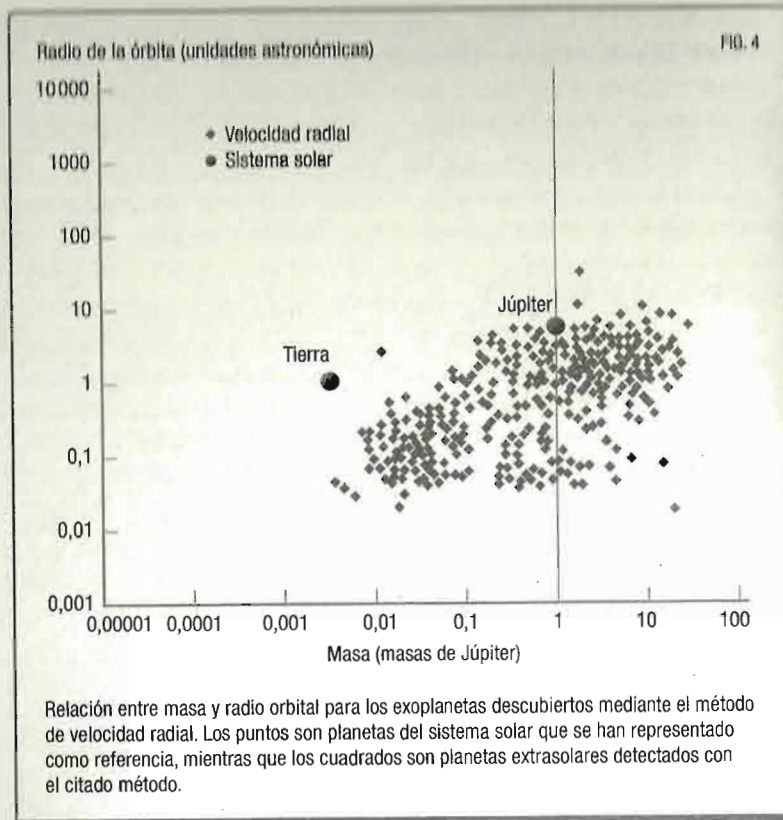
Los astrónomos necesitan grandes instrumentos de observación. El motivo fundamental es que el universo es un lugar oscuro, lleno de objetos interesantes pero muy lejanos. Por ello necesitamos concentrar la luz. Una posibilidad es utilizar cámaras o sistemas electrónicos, y otra, disponer de telescopios de gran apertura. Cuanto mayor sea la superficie colectora, mayor será la cantidad de energía recibida y, en consecuencia, mayor será el número de fuentes emisoras débiles que podrán observarse.

Las ondas limitan la visión

Si la luz se comportase solamente como partículas, un telescopio podría en principio aumentar las imágenes sin limitación. Es la naturaleza ondulatoria de la luz la que impone sus limitaciones, de tal forma que el mínimo detalle apreciable en una imagen depende del cociente λ/D , donde λ es la longitud de la onda utilizada para realizar la observación, y D , el diámetro de nuestro instrumento. Los actuales telescopios ópticos alcanzan fácilmente este límite (llamado «criterio de resolución de Rayleigh») mediante telescopios con pocos metros de apertura. En cambio, un telescopio de microondas (como el de Arecibo, Puerto Rico, en la imagen) trabajando al mismo límite de resolución que uno óptico necesitaría una apertura de centenares de metros. En el espectro de ondas de radio, el límite de resolución está muy lejos, y es necesario el concurso de varios radiotelescopios separados entre sí por grandes distancias para obtener imágenes precisas mediante interferometría.



Radiotelescopio de Arecibo, en Puerto Rico. Se trata de un instrumento de 305 m de apertura con la misma resolución que el ojo humano.



DE OCULTACIONES Y TRÁNSITOS

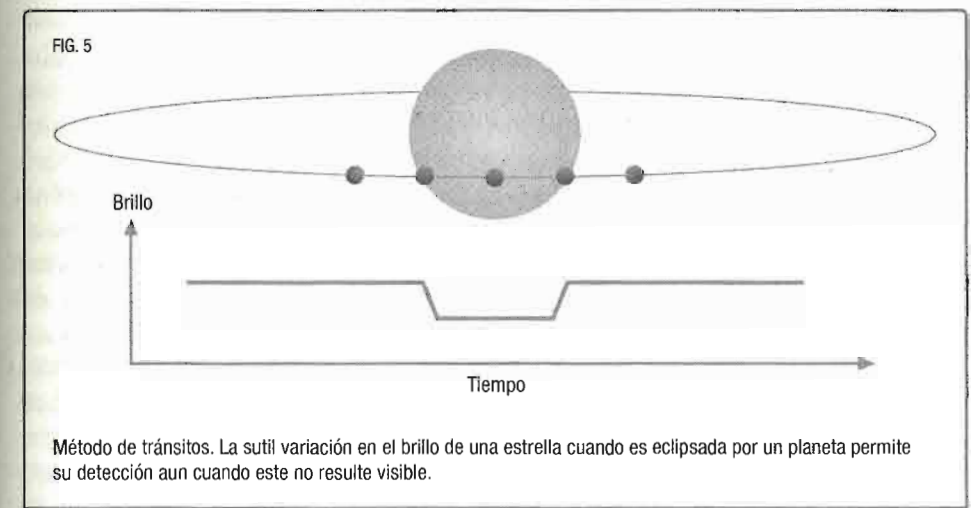
Supongamos que el plano de la órbita correspondiente a un sistema planetario extrasolar se encuentra de canto respecto a nosotros. Eso significa que, en ocasiones, un planeta se interpondrá entre nosotros y su sol, ocultando parte de este; en otros puntos de su órbita, parte de su cara iluminada contribuirá al brillo total de su estrella. Un fotómetro de alta precisión podría medir las diferencias de brillo para detectar el planeta; es el llamado método de tránsitos, o de ocultaciones (figura 5).

La limitación principal para observar una ocultación planetaria viene impuesta por la geometría: a no ser que la órbita del

planeta esté casi de canto respecto a nuestra línea de visión, no se podrán observar los tránsitos. De promedio, solo uno de cada varios miles de planetas extrasolares produciría un tránsito visible desde la Tierra, de forma que cualquier búsqueda tendrá que realizarse entre muchos millares de estrellas.

Existen dos parámetros que influyen fuertemente en la observación de tránsitos planetarios. El primero es el tamaño del planeta (cuanto más grande, más ocultará a su estrella). El segundo es el periodo de traslación orbital. Una sola observación de un tránsito permite sospechar de la existencia de un planeta, pero no nos proporciona información fiable sobre el periodo de rotación. Para ello es necesario observar durante al menos dos periodos, aunque tres sería lo ideal, ya que una estrella puede variar de brillo por otras causas (actividad de manchas solares en la superficie, por ejemplo). En el caso de Júpiter, cuyo periodo orbital es de 11,86 años, un hipotético observador tendría que esperar al menos 36 años. Eso significa que un planeta grande con un periodo orbital corto será más fácil de detectar.

Eso es lo que sucedió con el primer planeta observado mediante la técnica de tránsitos. En 1999 dos equipos de investigación trabajando de forma independiente detectaron una caída

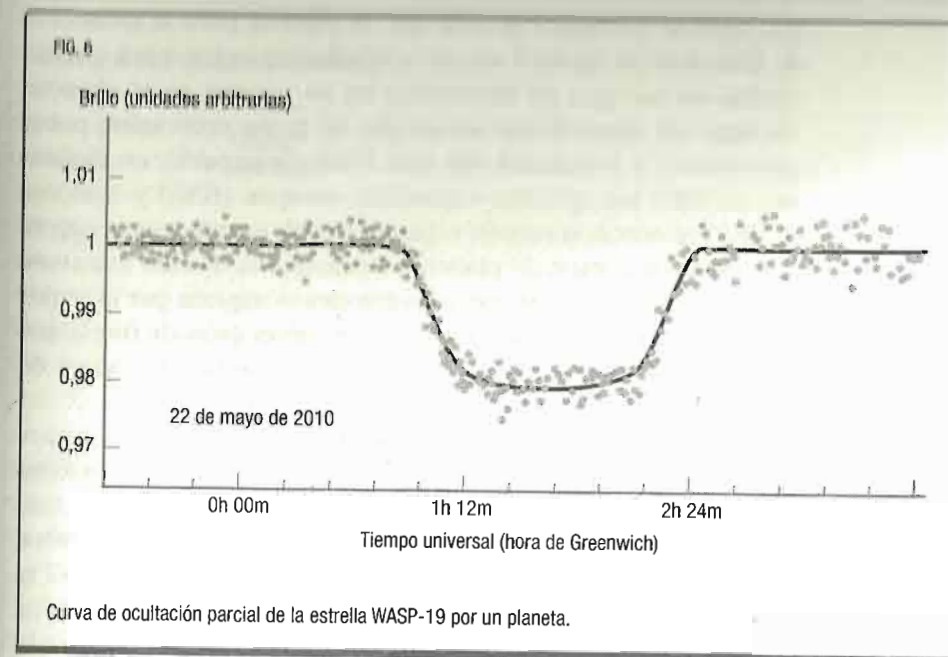


de un 1,5% en el brillo de la estrella HD 209458. A pesar de la distancia que nos separa de ella (150 años-luz), se pudo deducir la existencia de un cuerpo orbitando a apenas 7 millones de kilómetros en torno a la estrella, con un periodo de traslación de apenas media semana. La técnica del tránsito permitió asimismo determinar su radio, estimado en un 40% superior al de Júpiter.

Una gran ventaja del método de tránsito es que permite medir el tamaño del planeta, cosa que no puede hacerse con otros procedimientos. El inconveniente principal es que no permite obtener la masa absoluta del planeta. La solución habitual consiste en aplicar también la técnica de velocidad radial para deducir la masa (así como para confirmar el descubrimiento). Tal fue el caso de HD 209458 b, en el que se obtuvo una masa planetaria 0,7 veces mayor que la de Júpiter. Tenemos, por tanto, un planeta más ligero que Júpiter pero también más grande en tamaño, lo que viene explicado por su cercanía: el planeta está tan cerca de la estrella que su temperatura diurna supera los 1300 °C, lo que agranda considerablemente la atmósfera gaseosa.

Otro punto a favor de la técnica de tránsitos es la relativa facilidad de observación. El uso de la técnica de velocidad radial requiere medidas espectroscópicas de precisión extrema en grandes telescopios, pero las variaciones pequeñas que una ocultación inducen en el brillo de una estrella pueden medirse mediante telescopios pequeños. El principal problema es de índole práctica, ya que un tránsito es muy breve comparado con el periodo orbital, y ello fuerza a realizar un seguimiento automatizado de miles de estrellas durante mucho tiempo. Es el tipo de dificultades insalvables hace cincuenta años que hoy pueden resolverse fácilmente mediante procedimientos automatizados.

Un grupo del Centro Harvard-Smithsonian con financiación del Gobierno estadounidense ha desarrollado el proyecto de observación MEarth, basado en dos observatorios ubicados en ambos hemisferios (Arizona, Estados Unidos, y Cerro Tololo, Chile). Cada uno de ellos utiliza ocho telescopios con espejos de 40 cm de apertura (un calibre ligero en el mundo de la observación astronómica) para intentar detectar planetas orbitando alrededor de estrellas de tipo M. En diciembre de 2009 tuvieron



éxito con el descubrimiento del planeta Gliese 1214 b, un cuerpo con una masa 6,5 veces la terrestre.

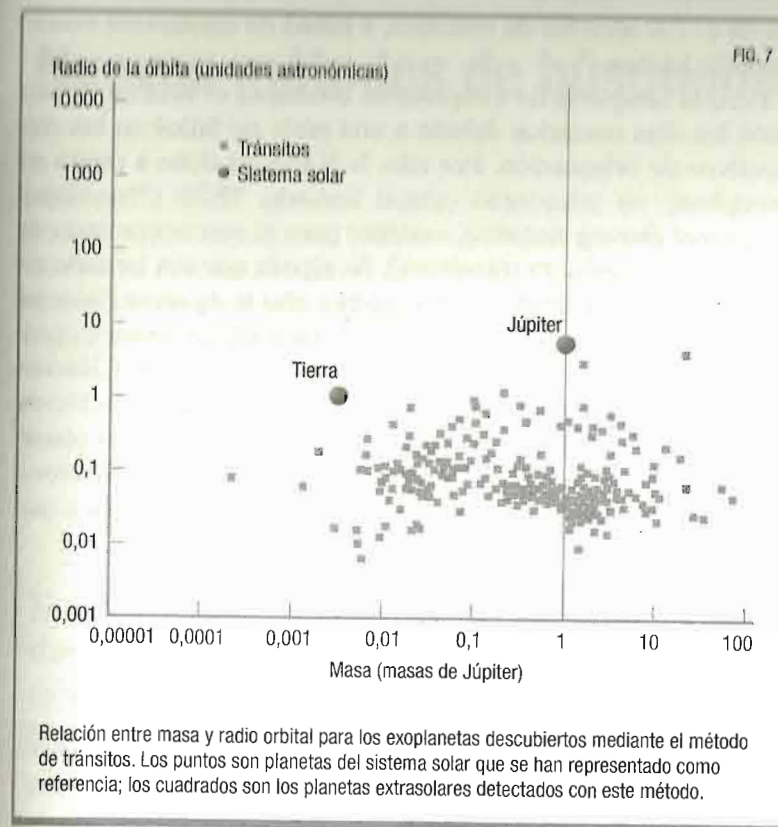
SuperWASP (*Wide Angle Search for Planets*, «búsqueda de planetas en ángulo amplio») es un proyecto similar (figura 6) que ha sido desarrollado por un consorcio de instituciones científicas europeas entre las que se encuentra el Instituto Astrofísico de Canarias. Al igual que su homólogo estadounidense, dispone de dos observatorios en ambos hemisferios (La Palma y Sudáfrica). Cada observatorio está equipado con un conjunto de ocho telescopios con aperturas de 10 cm, prácticamente iguales a teleobjetivos fotográficos, que escudriñan el cielo de manera totalmente automatizada. Hasta la fecha, SuperWASP ha descubierto cerca de un centenar de planetas extrasolares con masas entre un cuarto y veinte veces la de Júpiter.

La relativa simplicidad de los equipos necesarios para la construcción de observatorios similares a SuperWASP o MEarth hace posible detectar planetas de forma relativamente sencilla en tie-

ra, pero si queremos ir más allá, la carrera para la detección de tránsitos (la figura 7 muestra la relación entre masa y radio orbital en ese tipo de detección) ha de jugarse en el espacio, un lugar de observación ideal lejos de luces artificiales, polvo atmosférico y refracción del aire. Para conseguirlo, en diciembre de 2006 las agencias espaciales europea (ESA) y francesa (CNES) lanzaron la misión espacial Corot, uno de cuyos objetivos era la detección de planetas extrasolares usando tránsitos. La experiencia con los sistemas terrestres sugería que la mejor táctica pasaba por el uso de pequeños telescopios, de forma que Corot fue equipado con un pequeño instrumento de menos de treinta centímetros de apertura.

Apenas tres meses después del comienzo de la misión apareció el primer planeta, llamado Corot-1 b, con una masa casi idéntica a la de Júpiter, y un periodo orbital de 1,5 días. Durante más de seis años, Corot realizó una treintena de descubrimientos exoplanetarios. Algunos de los más notables fueron Corot-7 b, un planeta con una masa igual a 1,7 Tierras; y Corot-3 b que, con una masa 22 veces mayor que la de Júpiter, se encuentra en la frontera que separa un gigante gaseoso planetario de una estrella enana marrón.

Corot finalmente sufrió un fallo y dejó de funcionar a finales de 2012 pero tuvo un digno sucesor. En el año 2009 la NASA puso en órbita el satélite Kepler, dotado con un solo instrumento científico, un fotómetro que mide la intensidad de luz con alta precisión, adosado a un espejo de 1,4 m de apertura. Kepler tiene una sola misión: buscar planetas extrasolares. La precisión en la medición del brillo estelar es del orden de la milésima parte de un uno por ciento, lo que significa que sería capaz de observar dos bombillas de igual brillo, una de ellas a cien kilómetros de distancia y la otra un metro más cercana, y descubrir cuál de ellas se encuentra más lejos. Ese nivel de sensibilidad podría permitir detectar planetas del tamaño de la Tierra. Incluso sería capaz de detectar un planeta como Júpiter solamente mediante su luz reflejada. En sus tres años de misión oficial, Kepler examinó un total de 145 000 estrellas y detectó más de 2 700 planetas extrasolares. La cifra ha superado ya los 4 600, de los cuales aproxi-



madamente un millar han sido confirmados por otras técnicas de observación.

Gracias al Kepler, hoy se han detectado más planetas mediante tránsito que usando cualquier otra técnica. Siguiendo este procedimiento ya se han descubierto 1 305 planetas, un 62% del total. La mayoría de ellos tienen masas similares a la de Júpiter, pero se hallan unas diez veces más cerca de sus respectivas estrellas. El método de tránsitos también ha permitido el descubrimiento de los planetas extrasolares más lejanos hallados hasta el momento. Bautizados como SWEEPS-04 y SWEEPS-11, fueron descubiertos en 2006 gracias al telescopio espacial Hubble. Se trata de dos planetas que giran alrededor de sus estrellas a la increíble distan-

cia de 27700 años-luz de nosotros, a mitad de camino del centro de la Vía Láctea.

Pero la búsqueda de exoplanetas mediante el satélite Kepler tiene los días contados debido a una serie de fallos en los dispositivos de orientación. Por ello, la NASA ya tiene a punto su reemplazo, un telescopio orbital llamado TESS (*Transiting Exoplanet Survey Satellite*, «satélite para el reconocimiento de exoplanetas mediante tránsitos»). Se espera que sea lanzado en agosto de 2017. A finales de ese mismo año la Agencia Espacial Europea (ESA) y la Oficina Espacial Suiza planean lanzar su propio satélite de observación, bautizado como CHEOPS (*CHaracterising ExOPlanet Satellite*, «satélite para la caracterización de exoplanetas»), e incluso saben quién será su sucesor: el observatorio espacial PLATO (*Planetary Transits and Oscillations of stars*, «tránsitos planetarios y oscilaciones de estrellas»), que podría ser lanzado hacia 2024.

Nuevos métodos de búsqueda

Nueve de cada diez exoplanetas se han descubierto gracias a las técnicas de velocidad radial y de tránsito. Pero no son las únicas formas de localizarlos. Ya sea mediante observación directa o recurriendo a la teoría de la relatividad, la búsqueda continúa de formas cada vez más imaginativas.

Muchos de los métodos para observar el cielo y detectar planetas extrasolares se basan en la formación de imágenes. En los grandes telescopios, un espejo cóncavo (o una lente convergente) concentra los rayos de luz en una región pequeña. Allí donde antiguamente se ponía el ojo, hoy se colocan cámaras fotográficas, espectroscopios u otros instrumentos científicos, porque optimizan la tarea principal del telescopio: recoger fotones. Al igual que, en caso de llovizna, se necesitan grandes cubos para recoger una cantidad significativa de agua, los grandes instrumentos de observación tienen la tarea de concentrar los haces de luz procedentes de fuentes muy débiles.

A pesar de los avances técnicos, el modo de formar imágenes no ha variado en siglos. Los rayos pueden refractarse (desviarse) al pasar de un medio transparente a otro, como sucede cuando la luz sale de una lente, o bien reflejarse en una superficie especular. En los tiempos de Galileo los astrónomos utilizaron el primero de estos procedimientos hasta que los avances técnicos hicieron posible la construcción de grandes espejos curvos. Más recientemente se comenzó a utilizar una tercera forma de desviar la luz: usando un campo gravitatorio. Ya Isaac Newton, cuando

desarrolló su teoría de la gravedad, incluyó la posibilidad de que un rayo de luz pudiera ser desviado por un objeto con gravedad. Mucho más tarde, en 1936, Einstein publicó un breve artículo en el que exploraba la posibilidad de usar un campo gravitatorio como lente. Imaginemos, explicó, dos estrellas, A y B, y un observador que se encuentra alineado con ellas (figura 1). Mientras

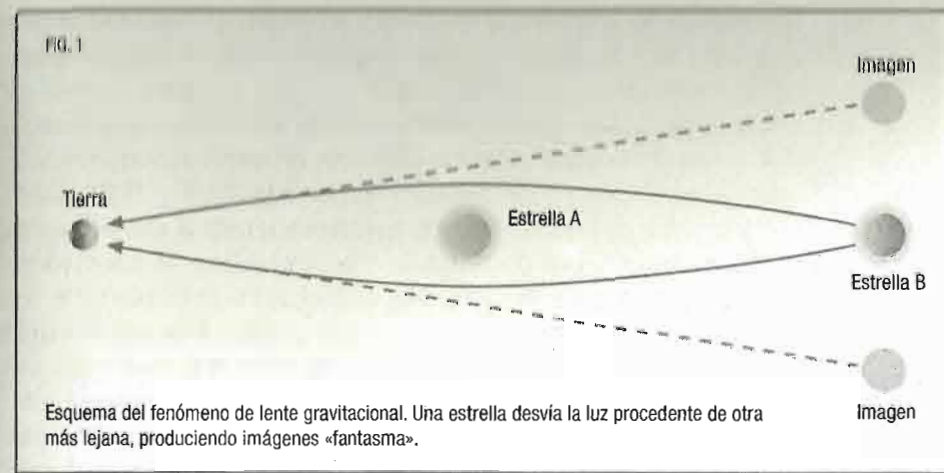
La teoría más plausible plantea que los planetas se crean a partir del material de acreción formado alrededor de una estrella y que en torno a las enanas rojas los planetas de la dimensión de la Tierra y Neptuno son más comunes que los del tamaño de Júpiter.

BOHDAN PACZYŃSKI

que la estrella lejana B emite una luz que no llegará hasta el observador porque la estrella A la bloquea, los rayos de luz de B que pasen rasantes alrededor de A serán desviados por el campo gravitatorio de dicha estrella. En caso de que la simetría del sistema fuese perfecta, al observador se le aparecería la estrella B como un anillo de luz alrededor de A (llamado *anillo de Einstein*). Pero si el observador no se encontrase exactamente en la línea que une las estrellas A y B,

lo que vería sería un conjunto de puntos alrededor de la estrella más cercana. En ambos casos, la imagen percibida por el observador sería más brillante que la que vería si pudiera observar la estrella B directamente. La estrella A ejerce así como sistema concentrador de luz. Einstein hizo notar que el aumento de brillo requiere un alineamiento casi perfecto entre la estrella (u objeto) a observar, la estrella «lente» y el observador. Dada la inmensidad del espacio, es altamente improbable encontrar dos estrellas casi perfectamente alineadas y a la distancia adecuada para su observación, tanto que incluso Einstein consideró este efecto como una curiosidad sin implicaciones prácticas.

Aunque la idea de la lente gravitacional como método para realizar observaciones astronómicas fue retomada una y otra vez durante los siguientes treinta años, no fue tomada en serio hasta que en 1979 un equipo angloestadounidense descubrió una pareja de quásares (una fuente astronómica de energía electromagnética) muy cercanos entre sí en el cielo. Este tipo de obje-



tos, en cuyo centro un agujero negro supermasivo emite gigantescos destellos de radiación procedente de la materia que atrae, son los más energéticos del universo conocido, pero debido a su extremada lejanía, aparecen como puntos de luz muy débiles, incluso frente a los más sensibles telescopios, y solo un análisis espectroscópico permite caracterizarlos. En este caso se descubrió que, en realidad, se trataba de dos imágenes del mismo quásar, formadas por una galaxia que actúa como lente. En 1985, un estudio reveló una de las vistas más impresionantes del universo: una lente gravitacional que muestra cuatro imágenes del mismo quásar alrededor de una galaxia. El conjunto recibió el nombre de G2237 + 0305 y es conocido con el nombre de *Cruz de Einstein* (véase la imagen superior de la pág. 77).

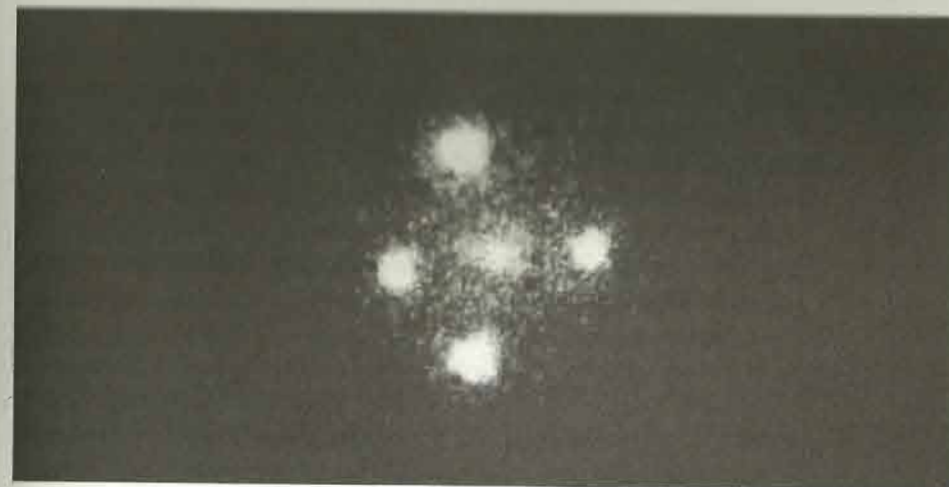
El análisis de la luz de los quásares desviada por lentes gravitacionales se ha convertido en una herramienta para avanzar, entre otras cosas, en el conocimiento de la masa de las galaxias, la búsqueda de la llamada materia oscura, la distribución de materia del universo y el estudio de su expansión. La posibilidad de observar lentes gravitacionales compuestas por objetos de tamaño estelar, no por quásares o galaxias, fue revitalizada en 1986 por el astrofísico polaco Bohdan Paczyński (1940-2007). Aunque la probabilidad de encontrar dos estrellas en línea, o casi, es

muy pequeña, y el fenómeno duraría poco porque las estrellas se mueven, será mayor si observamos regiones del cielo donde las estrellas están más concentradas.

Paczynski propuso dos regiones de alta concentración estelar: el halo que envuelve la Vía Láctea y las galaxias enanas conocidas como Nubes de Magallanes. El halo contiene agrupaciones de estrellas conocidas como cúmulos globulares, y se estima que puede albergar gran cantidad de cuerpos que no pueden verse (como las enanas marrones, que no brillan con luz visible), lo que proporcionaría gran cantidad de lentes gravitacionales; por su parte, las Nubes de Magallanes (véase la imagen inferior de la página contigua) son galaxias satélite de la Vía Láctea que concentran gran cantidad de estrellas en una pequeña región del cielo. Según los cálculos del astrofísico polaco, una de cada millón de estrellas observadas podría ser, en realidad, una imagen producida por una lente gravitacional.

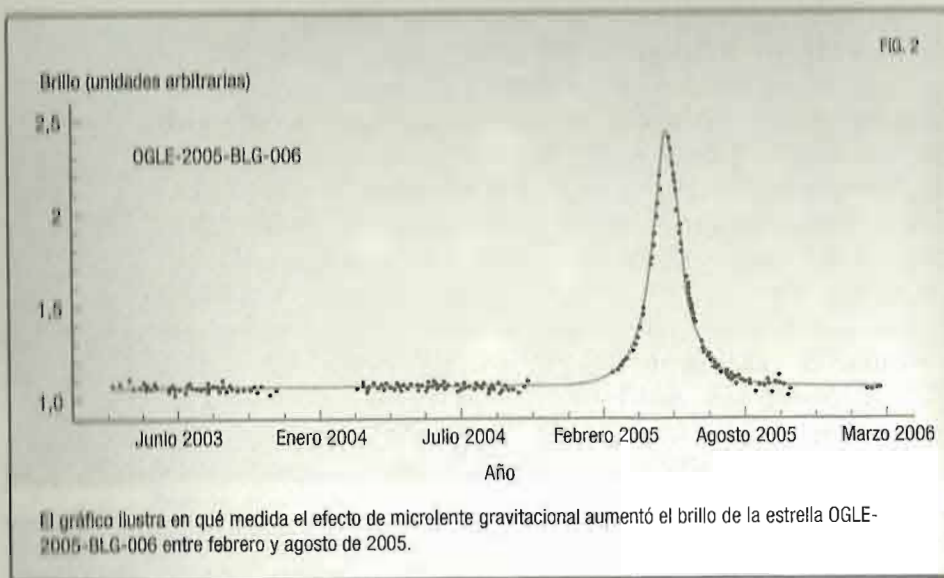
Dispuesto a respaldar sus afirmaciones con experimentos, Paczynski y un grupo de colegas de la Universidad de Varsovia iniciaron a mediados de la década de 1990 el experimento OGLE (*Optical Gravitational Lensing Experiment*, «experimento sobre lentes gravitacionales ópticas»). Basado en un telescopio de 1,3 m de apertura instalado en el Observatorio Las Campanas de Chile, el OGLE fue concebido para, entre otros objetivos, buscar materia oscura en el universo mediante la técnica de lente gravitacional. El experimento fue todo un éxito: entre 1992 y 2009 permitió detectar más de 4000 eventos de lente correspondiente a diversos objetos, entre ellos quásares y estrellas binarias. Aunque Paczynski falleció en 2007, su proyecto sigue aportando resultados.

Pero ¿qué aplicaciones tienen las lentes gravitacionales en la búsqueda de exoplanetas? La respuesta es sencilla: esa técnica aumenta el brillo del objeto de estudio (figura 2). Si una estrella lejana, cuya luz es desviada por la gravedad, tiene un planeta en tránsito, el efecto de este también aumenta. El propósito, por tanto, es aumentar la eficacia de la observación mediante tránsitos. Esta técnica se denomina *microlente gravitacional* para distinguirla de otras lentes más duraderas, como por ejemplo la Cruz de Einstein.



Arriba, el efecto de lente gravitacional G2237 + 0305, conocido popularmente como «Cruz de Einstein». Se trata de cuatro imágenes del mismo quásar, creadas por una galaxia situada en el centro, a gran distancia de aquel. Abajo, la Gran Nube de Magallanes, una galaxia satélite de la Vía Láctea que concentra gran cantidad de estrellas. Muchas de ellas podrían ser en realidad la imagen resultante de una lente gravitacional.





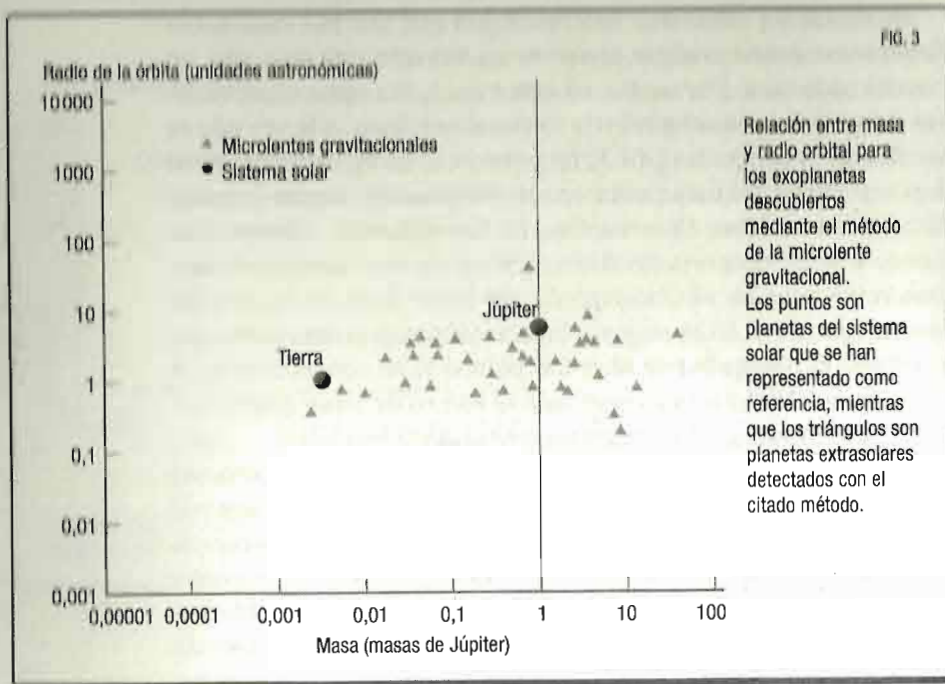
Pero las probabilidades de éxito son minúsculas. Al igual que sucede con otros métodos, la condición de éxito más favorable consiste en efectuar una búsqueda automatizada de millones de estrellas con la esperanza de que el número de lotería toque alguna vez. Al llegar el nuevo siglo, el OGLE sufrió una renovación electrónica, y en 2004 el esfuerzo dio sus frutos: el descubrimiento de un planeta 2,6 veces más masivo que Júpiter, un caso especial por dos motivos. Para empezar, se trató del primer exoplaneta descubierto mediante la técnica de microlente, confirmando así las conjeturas de Einstein tras casi setenta años. El segundo es la enorme distancia a la que se encuentra el nuevo exoplaneta. Hasta entonces los cuerpos planetarios más distantes descubiertos se hallaban a menos de 500 años-luz de la Tierra, y solamente tres de ellos se encontraban más allá de esa distancia. El nuevo descubrimiento, situado a nada menos que 17 000 años-luz de nosotros, batió todas las marcas, y mostró de modo contundente que la búsqueda de planetas extrasolares podía realizarse mucho más allá de nuestro vecindario estelar.

Sin embargo, confirmar una detección que, por sus características, solamente consigue observar un tránsito una sola vez, no resulta nada fácil. Por suerte, en este caso había otros observadores de microlentes actuando de forma simultánea. A la vez que se establecía el programa OGLE, un consorcio de investigadores de Japón y Nueva Zelanda fundaron un observatorio similar llamado MOA (*Microlensing Observations in Astrophysics*, «observaciones de microlentes en astrofísica») que opera en el hemisferio sur, concretamente en el Observatorio de Mont John en Nueva Zelanda. Gracias al MOA se pudo llevar a cabo una observación que confirmó la realizada por el grupo polaco y, en consecuencia, el primer planeta detectado mediante el efecto de lente gravitacional tiene el largo y críptico nombre: OGLE235-MOA53 b.

Durante el año siguiente fueron descubiertos tres planetas extrasolares más, todos a distancias superiores a los diez mil años-luz, demostrando que el éxito inicial del método de las microlentes no había sido fruto del azar. Campañas de observación posteriores han aumentado el número de planetas descubiertos mediante ese método hasta 46. Todos se encuentran a distancias que se miden en miles de años-luz, y casi en su totalidad se hallan en la dirección del núcleo de nuestra galaxia.

El más lejano, descubierto en 2015 por un equipo internacional liderado por Corea del Sur, es un planeta conocido con el nombre de KMT-2015-1 b, y representa el primer éxito del nuevo proyecto KMTNet (*Korea Microlensing Telescope Network*, «red de telescopios para microlentes de Corea»), un grupo de tres telescopios ubicados en Chile, Sudáfrica y Australia. El lejano exoplaneta se encuentra a casi 27 700 años-luz de nosotros. El más cercano, el OGLE-2009-BLG-151 MOA-2009-232 b, se halla a «solo» 1270 años-luz de distancia. La luz de esta estrella, que los observatorios terrestres captaron en 2009 y permitió deducir la existencia del planeta, se emitió en el año 739 de nuestra era, hacia la época en que la expansión musulmana era detenida en Poitiers por Carlos Martel.

Sin duda, las dificultades del método de microlentes gravitacionales (en la figura 3 se establece la relación entre masa y radio orbital en la detección de exoplanetas mediante esta técnica)



ca) han sido grandes, pero los resultados valen la pena. Gracias a él, los astrofísicos descubren planetas con masas mayores de lo que permitía el método de tránsitos y lo más llamativo es que ha aumentado enormemente la distancia a la que los exoplanetas pueden detectarse: 22 de los 25 exoplanetas más lejanos han sido descubiertos gracias a microlentes, una técnica que quizá sea una de las pocas capaces de encontrar los llamados «planetas errantes», que tras abandonar su sistema planetario vagan libremente por el espacio, libres de ataduras gravitacionales.

OBSERVACIÓN DIRECTA

Aunque las técnicas indirectas de detección han permitido hallar centenares de planetas, no podemos verlos directamente. El enorme contraste entre su brillo y el de su estrella plantea difi-

cultades observacionales tan grandes que, para intentarlo, debe haber una razón poderosa que vaya más allá de la satisfacción personal de poner el ojo en el ocular del telescopio y ver una minúscula mota de luz.

Desde el punto de vista científico, una observación directa sería una fuente de información extraordinaria porque permitiría realizar un análisis espectroscópico, lo que proporcionaría información sobre la composición de ese planeta. Podríamos detectar la existencia de una hipotética atmósfera, saber si tiene nubes o buscar trazas de oxígeno o de clorofila que nos revelasen la presencia de vida. Fuera de una visita *in situ*, sería la forma más completa y eficaz de explorar un planeta extrasolar.

La cuestión, como en otros casos, es determinar si resulta factible. Porque una cosa es advertir la sombra del planeta, y otra muy distinta ver realmente su superficie a pesar del fulgor de su estrella. Nuestro Sol emite luz en todas las direcciones del espacio y una pequeña parte de ella ilumina la Tierra. Un cálculo sencillo nos muestra que la fracción de la luz solar reflejada por nuestro planeta es de una parte por cada 550 000 000. Esa es, aproximadamente, la diferencia entre la estrella más brillante que podemos ver en el cielo nocturno y la más débil perceptible con el telescopio Hubble.

Una forma de mejorar las probabilidades de detección es recordar que, en astrofísica, el término «observar» es muy elástico. Nuestros ojos están adaptados para captar un rango de ondas electromagnéticas concretas que, precisamente por eso, llamamos «luz visible». Pero existen otros tipos de radiación, desde las ondas de radio hasta los rayos X, que pueden ser captados por instrumentos especializados. Algunos tipos de ondas, como los infrarrojos, se detectan mediante telescopios similares a los de observación óptica. Se trata, por tanto, de observar en una frecuencia en la que la diferencia de brillo entre planeta y estrella no sea tan acusada.

Pero ¿cuáles son las frecuencias adecuadas para nuestra misión? En principio deben estar fuera del espectro de luz visible, de esa forma tendremos mejores oportunidades de detección que frente a la intensa emisión de la estrella en ese rango de

frecuencias. Eso nos deja dos posibilidades: la franja ultravioleta o la infrarroja. En la primera será físicamente inviable porque, según establece la ley de Wien, la frecuencia de máxima emisión de un cuerpo depende en forma directa de su temperatura. Como la energía de las estrellas está en el espectro de luz visible, un planeta que emitiera una cantidad significativa de energía en forma de radiación ultravioleta —de mayor frecuencia que la luz visible— estaría más caliente que su propia estrella, algo que prohíben las leyes de la termodinámica.

Sin embargo, un planeta sí puede emitir en el infrarrojo, y allí las condiciones son mejores. La luz visible que emite el Sol es unos diez mil millones de veces más intensa que la de la Tierra, pero se reduce a «solo» diez millones en el infrarrojo cercano; en el caso de Júpiter, la relación es similar. La luz infrarroja permite mejores posibilidades de detección, siempre que se resuelvan una serie de dificultades. La primera consiste en establecer un delicado equilibrio entre el contraste y el brillo absoluto. Si escogemos una frecuencia en el infrarrojo lejano puede que el brillo relativo del planeta respecto al de su estrella sea mayor, lo que nos daría mayor contraste, pero el brillo absoluto puede disminuir tanto que resultará inobservable.

Incluso en las mejores circunstancias, la luz de la estrella seguirá siendo enormemente intensa en relación a la de su planeta. Sería algo así como intentar observar el cielo nocturno cuando tenemos una bombilla cercana encendida. En el supuesto de que no podamos apagarla, nuestro impulso inmediato sería extender la mano para tapar el brillo de la bombilla, ¿verdad? Pues eso es justamente lo que debemos hacer con la estrella. En cierto modo, también es lo que sucede durante un eclipse solar. En este caso, la Luna se interpone entre el Sol y la Tierra, convierte el día en noche y permite ver las estrellas.

Lo cierto es que, en la práctica, no resulta útil el uso de la Luna como bloqueador solar. Nuestro satélite brilla demasiado y, por supuesto, no podemos moverlo a voluntad para que pueda ocultar una estrella cuando nos interese. Los astrofísicos utilizan en su lugar un bloqueador artificial de luz llamado «coronógrafo». Su nombre se debe a que originariamente esos dispositivos se

acoplaban a los telescopios para ocultar el disco del Sol, lo que permite observar una hermosa zona de gas brillante a su alrededor: la corona solar.

La aplicación de una mejora técnica tras otra ha permitido elevar la sensibilidad de los coronógrafos hasta el punto en que pueden usarse para detectar planetas extrasolares mediante observación directa. Los primeros intentos serios comenzaron en 2002 y para maximizar las probabilidades de éxito se utilizó el que entonces era el mayor telescopio del mundo: el Keck II, un gigantesco ojo de diez metros de diámetro, ubicado a más de 4100 m sobre el nivel del mar, en la montaña de Mauna Kea, en Hawái. Sin embargo no fueron los primeros en alcanzar el éxito. Ese honor le corresponde a un grupo francoestadounidense de investigadores que en 2004 utilizó un instrumento de observación en infrarrojos acoplado al VLT (*Very Large Telescope*), uno de los telescopios de ocho metros de abertura situado en el Observatorio Paranal, en Chile. Las observaciones en el infrarrojo cercano mostraron un exoplaneta con un brillo unas veinte veces menor que el de su estrella, una enana marrón conocida con el código 2M1207 y distante 170 años-luz de la Tierra. Se trata de una estrella cuya edad se estima en ocho millones de años, apenas un suspiro en comparación con los 4500 millones de años que se atribuyen al Sol. Proporcionalmente, la relación de edades sería la misma que la de un bebé de mes y medio con un adulto de 65 años. Se trata, por tanto, de un sistema planetario recién formado, hablando en términos astronómicos.

Uno de los descubrimientos más llamativos realizados mediante observación directa tuvo lugar en 2008. Por vez primera, un grupo de astrofísicos descubrió un planeta mediante imagen directa en longitudes de onda visibles. La estrella, llamada Fomalhaut o Alfa Piscis Austrini, es la 18.^a más brillante de nuestro cielo, y es una vecina cósmica bastante cercana, pues se halla a apenas 25 años-luz de distancia. Además del planeta, bautizado como Fomalhaut b (la imagen superior de la pág. 85 muestra el disco protoplanetario que gira a su alrededor), se descubrió que el sistema planetario incluye una serie de anillos formados por pequeñas partículas. De ese modo, Fomalhaut no solamente es

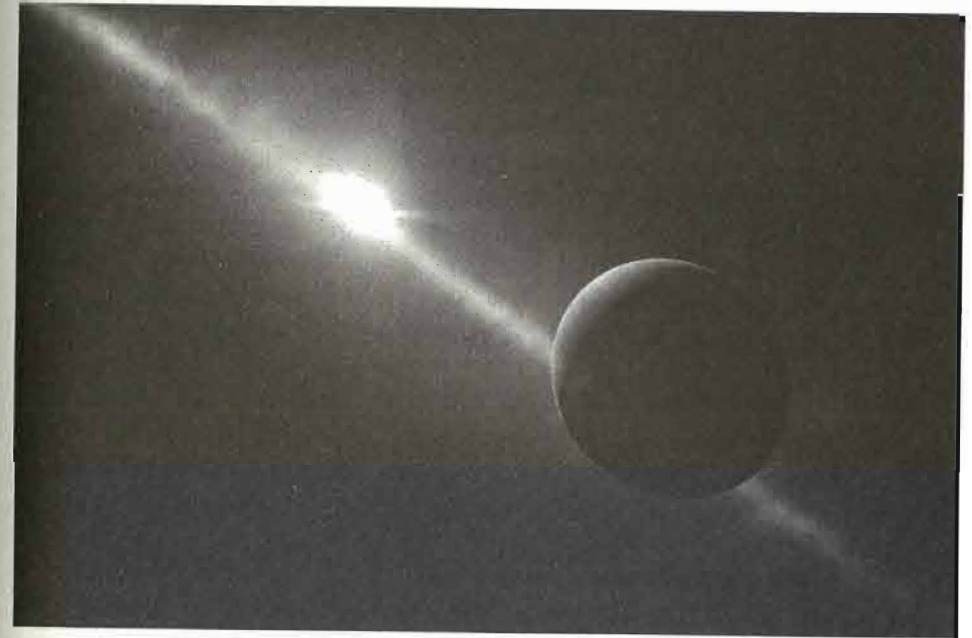
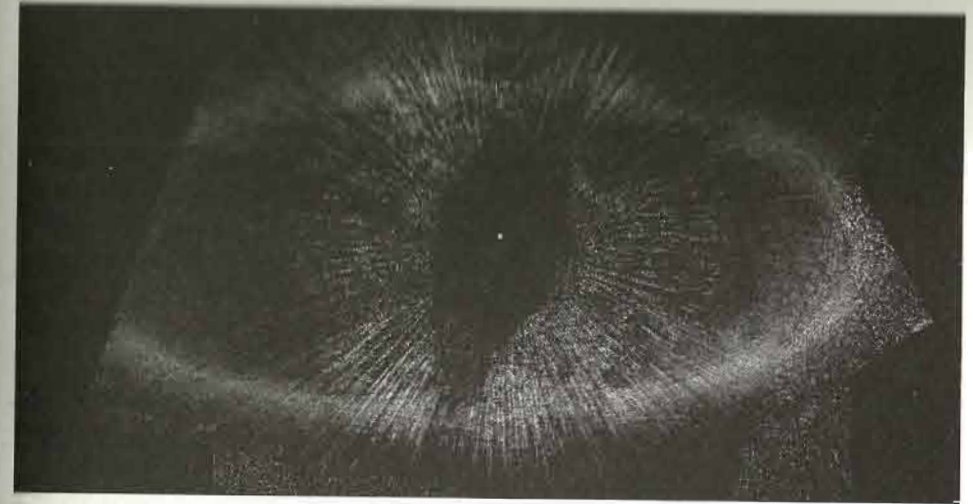
el hogar de un planeta sino también un objetivo de observación ideal para estudiar la formación de un sistema solar.

Otro objetivo interesante para observar es Beta Pictoris (véase la imagen inferior de la página contigua), otra estrella muy joven (de unos veinte millones de años de edad), que emite con intensidad en el infrarrojo. Una observación cuidadosa muestra que este exceso de energía se debe a un grueso disco protoplanetario de polvo y gas que orbita alrededor de la estrella. También se reveló la existencia de un planeta, el Beta Pictoris b, con una masa siete veces superior a la de Júpiter. La técnica de la espectroscopía permitió descubrir que el planeta gira sobre su eje con un periodo de unas ocho horas. Obtener el periodo de rotación de un planeta situado a más de 60 años-luz de la Tierra es una muestra contundente de la utilidad de los métodos de observación directa en lo referente a la detección de exoplanetas.

Como cuarto ejemplo, en agosto de 2015 un grupo internacional de astrofísicos anunció el descubrimiento de un planeta gigante gaseoso orbitando la estrella 51 Eridani, a 96 años-luz de la Tierra. Utilizando un telescopio de ocho metros de apertura ubicado en Chile llamado Gemini y un nuevo coronógrafo de última generación, el GPI (*Gemini Planet Imager*, «generador de imágenes de planetas Gemini»), consiguieron datos, no solamente del planeta, sino también de su atmósfera. Por ejemplo, las medidas espectroscópicas en el infrarrojo confirmaron la existencia de metano y vapor de agua.

Hasta la fecha, la observación directa de planetas girando en torno a estrellas ha arrojado ya la cifra de 65 descubrimientos confirmados, un 3% del total. Salvo dos excepciones, tienen masas superiores a la de Júpiter, llegando casi hasta el límite de una enana marrón. Cabe destacar las enormes distancias que separan estos planetas de sus respectivas estrellas. Fomalhaut b gira en una órbita de más de un billón de kilómetros de radio, casi siete mil veces más lejos que la distancia que media entre la Tierra y el Sol. A esa distancia la luz de la estrella tarda casi mes y medio en llegar al planeta.

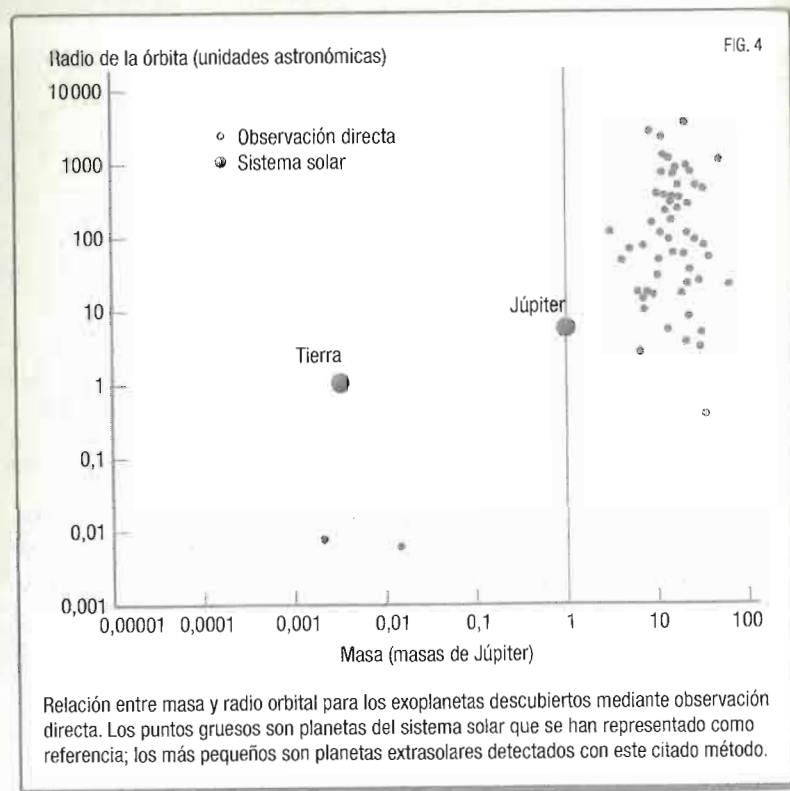
La exploración mediante imagen directa de planetas extrasolares se basa de modo casi exclusivo en el uso de observatorios



La curiosa forma del disco de material protoplanetario que gira alrededor de la estrella Fomalhaut (imagen superior) le ha valido el popular nombre de «Ojo de Sauron». Abajo, concepción artística del sistema estelar Beta Pictoris. Se trata de una estrella de tipo espectral que se halla en la constelación de Pictor, situada a unos 60 años-luz de la Tierra. Su masa es 1,8 veces la masa del Sol y su temperatura superficial es de 8500 K.

con base en tierra. Tanto los proyectos actuales como los de futuro inmediato utilizan los observatorios terrestres más grandes, junto a los sistemas de coronógrafos y espectroscopios más sensibles fabricados jamás.

Las técnicas de imagen directa (la figura 4 establece la relación masa y radio orbital para este tipo de detección de exoplanetas) también permiten detectar planetas errantes. Aunque parezca una redundancia (la misma palabra «planeta» significa «errante» o «vagabundo»), en ocasiones un planeta puede abandonar el sistema solar en el que se formó y vagar por la galaxia como un cuerpo libre. Carente de estrella acompañante, las técnicas que dependen de una órbita alrededor de un sol resultan inútiles a la hora de vislumbrar esos vagabundos espaciales.



Hasta la fecha, el número de descubrimientos de planetas errantes es pequeño y aun estos han de tomarse con precaución. Algunos científicos creen que puede haber millones de planetas errantes por descubrir. Es una tendencia general que apunta que, cuanto menor es el tamaño de un objeto, mayor es su abundancia relativa. Al igual que en nuestras playas, donde el número de granos de arena supera al de guijarros, las estrellas más pequeñas y menos masivas son mucho más frecuentes que las grandes. Es posible, por tanto, que el número de planetas errantes supere con mucho al de enanas marrones. Posiblemente, los métodos de observación directa en el infrarrojo, en combinación con las microlentes gravitacionales, aportarán en los próximos años grandes sorpresas en este campo.

LA ACCIDENTADA EVOLUCIÓN DE LA ASTROMETRÍA

En ausencia de influencias externas, la trayectoria que sigue un objeto en movimiento es una línea recta. Esta sencilla norma, conocida como la primera ley de Newton, rige el comportamiento de una estrella aislada, de tal forma que, al realizar observaciones precisas de la posición de una estrella, deberíamos confirmar un desplazamiento rectilíneo por la bóveda celeste. Existen, sin embargo, ocasiones en las que esto no sucede así, y para entenderlo debemos profundizar en nuestro conocimiento del movimiento planetario.

Si partimos del sistema Tierra-Luna como ejemplo, vemos que, aunque habitualmente consideramos que es la Luna la que gira alrededor de nuestro planeta, en realidad la atracción es mutua: también la Tierra gira alrededor de la Luna. Para ser precisos, ambos cuerpos giran en torno al llamado «centro de masas» —también llamado «baricentro»— del sistema. Como en este caso el centro de masas del sistema se encuentra a unos 1640 km bajo la superficie terrestre, la afirmación de que la Luna gira alrededor de la Tierra es correcta.

Imaginemos ahora un observador externo que ve el sistema Tierra-Luna. Según la primera ley de Newton, el centro de masas

se moverá con velocidad constante. Por su parte, tanto nuestro planeta como su satélite girarán alrededor de dicho centro. La combinación de ambos movimientos hace que, visto desde el exterior, la Tierra y la Luna no se muevan en línea recta sino con un movimiento de bamboleo (figura 5).

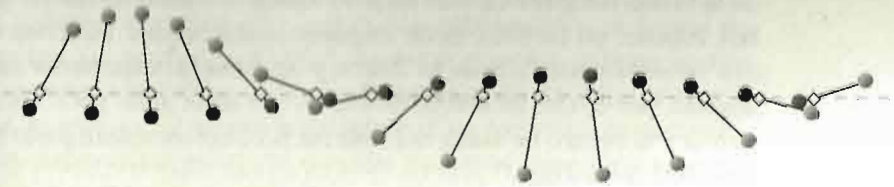
Ahora imaginemos que la Luna es invisible para nuestro observador externo. Incluso en ese caso, el movimiento de bamboleo de la Tierra permite deducir la presencia de la Luna; de hecho, sería la única explicación posible. Mediante el mismo procedimiento podemos deducir la existencia de un planeta orbitando alrededor de una estrella a partir de técnicas de astrometría, es decir, de la medición precisa de sus movimientos.

En la década de 1830, el astrónomo alemán Friedrich Bessel (1784-1846) intentó determinar la distancia que nos separa de determinadas estrellas. Su técnica consistía en medir la posición de una estrella en dos momentos separados por un periodo de seis meses. Entre una observación y otra, la Tierra y los observadores que viajan con ella se encontrarían en puntos opuestos de su órbita, lo que permitiría obtener la distancia mediante una sencilla técnica de triangulación conocida como paralaje (figura 6).

Una de las estrellas observadas por Bessel fue Sirio (Alfa Canis Maioris), la más brillante del firmamento nocturno y una de las más cercanas a nosotros. Descubrió que su movimiento no era rectilíneo, sino que tendía a desviarse tras un periodo de unos 50 años. Eso le hizo concluir, en 1844, que la estrella tenía una compañera no vista hasta entonces. Efectivamente, en 1862 se descubrió mediante observación directa la estrella «consorte», conocida hoy como Sirio B, con un brillo 8000 veces menor. De modo similar, se le descubrió una compañera a Proción (Alfa Canis Minoris). Tras ser predicha por Bessel en 1844, esta fue observada por vez primera en 1896.

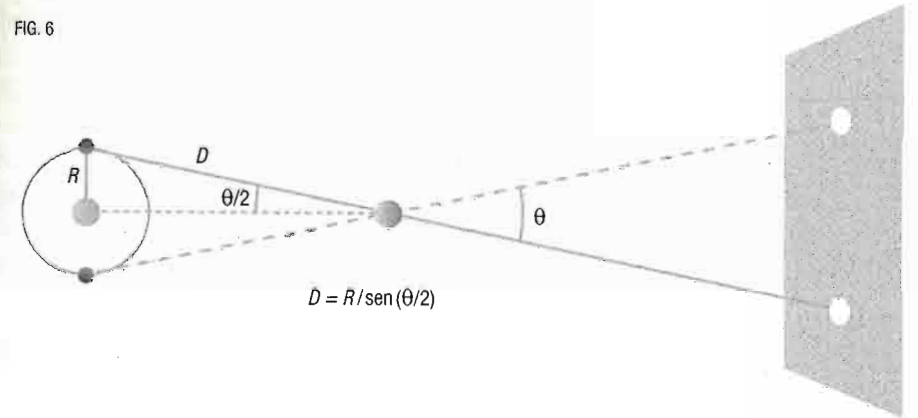
Pero ¿puede aplicarse esta técnica para detectar planetas extrasolares? En teoría sí; en la práctica, como sucede con las demás técnicas, depende de los detalles. Tanto Sirio B como Proción B son estrellas del tipo enana blanca, con luminosidad mucho menor pero masa similar a la de sus respectivas compañeras, hecho que ayudó a su detección, ya que en ese caso el centro de

FIG. 5



Movimiento de dos cuerpos en ausencia de fuerzas externas. Cada uno de los cuerpos efectúa un movimiento de bamboleo, pero su centro de masas común (rombo blanco) se mueve en línea recta.

FIG. 6



Paralaje estelar. Conocidos el ángulo de desviación θ y el radio R de la órbita terrestre, la distancia D a la estrella es fácilmente calculable.

masa está aproximadamente a mitad de camino del par binario. El problema es que los planetas son mucho menos masivos que sus estrellas, y el centro de masa tiende a ubicarse cerca del objeto más masivo. A consecuencia, los tirones gravitatorios del planeta apenas se notan en la trayectoria de la estrella.

Hagamos números con nuestro sistema solar. Supongamos que todos los planetas han desaparecido, salvo la Tierra, cuya masa es apenas tres millonésimas partes de la solar. Eso situaría el centro de masas a tan solo 450 km del centro del Sol, una insignificancia frente a los 700 000 km de su radio. Cualquier bamboleo producido en el movimiento solar por la Tierra será prácti-

camente imperceptible. Por otro lado, cuanto mayor sea el radio de la órbita del planeta, más alejado estará el centro de masas del Sol. Júpiter, en cambio, tiene mejores posibilidades. Su masa es 318 veces superior a la de la Tierra, y se encuentra 5,2 veces más alejado, por lo que su efecto de bamboleo sería unas 1650 veces mayor y el centro de masa del sistema Sol-Júpiter estará justo en la superficie del Sol.

Los problemas prácticos que se derivan de una observación serán formidables. Incluso para los mayores telescopios, una estrella es poco más que un punto luminoso. Por ese motivo, los primeros intentos de detectar planetas extrasolares mediante astrometría fueron muy controvertidos. Los primeros informes supuestamente favorables datan de la Segunda Guerra Mundial. Años más tarde, en 1963, se anunció el descubrimiento de un planeta algo más masivo que Júpiter orbitando la llamada estrella de Barnard, una enana roja a tan solo seis años-luz de la Tierra. Sin embargo, el descubrimiento acabó por ser desestimado, pues se comprobó que este había sido fruto de una serie de errores de observación.

La validez del método astrométrico para la búsqueda de planetas extrasolares ha tardado mucho en establecerse. En el año 2009 se anunció el descubrimiento de VB10 b, un gigante gaseoso con seis veces la masa de Júpiter, pero otros investigadores realizaron estudios independientes y descartaron su existencia. En 2010 llegó el único caso confirmado hasta la fecha de observación astrométrica de un exoplaneta, el llamado HD 176051 b.

Así las cosas, y considerando su escaso éxito, ¿realmente vale la pena perder el tiempo con la astrometría? La respuesta es sí. La mayoría de las otras técnicas son útiles en el caso de grandes gigantes gaseosos, ya que un planeta pequeño ejerce una influencia muy pequeña en técnicas como la de velocidad radial o el método de tránsitos. En el caso de la astrometría, el efecto del planeta depende del producto de su masa por la distancia a su estrella. Eso significa que un planeta poco masivo a gran distancia de su estrella podría ejercer una influencia igual a la de un gigante gaseoso muy cercano. Al contrario que la técnica de velocidad

radial, los resultados de la observación astrométrica no dependen del tipo de estrella, su masa o su velocidad de rotación.

Cualquier campaña de observación astrométrica en busca de exoplanetas también proporcionará información valiosa acerca de la propia estrella y sobre la formación de sistemas planetarios, lo que no es menos importante. Una exploración astrométrica sistemática permitirá ampliar nuestros conocimientos sobre la distribución de estrellas en nuestra galaxia, su distancia a la Tierra, sus movimientos, luminosidad y evolución. Por esos motivos, la Agencia Espacial Europea (ESA) lanzó en diciembre de 2013 el observatorio orbital Gaia. Se trata de un agrimensur cósmico que continúa la labor de su sucesor, el satélite Hiparcos, con una precisión sin precedentes.

Se estima que, para cuando haya terminado su misión de exploración, Gaia podría haber detectado unos 70 000 mundos extrasolares. De cumplirse esta predicción, Gaia permitirá ampliar nuestro conocimiento sobre los exoplanetas a una escala nunca vista desde el lanzamiento del observatorio Kepler.

CRONOMETRAJE DE PÚLSARES

Imaginemos una estrella de gran masa en las etapas finales de su vida. Las reacciones termonucleares que la mantienen ya han llegado a su fin y son incapaces de seguir impidiendo el colapso de la estrella debido a su propia gravedad. A consecuencia de ello, los átomos se deshacen, y los protones y electrones que los forman se combinan para crear neutrones. La estrella acaba por convertirse en un núcleo atómico gigantesco, un objeto masivo y compacto conocido como estrella de neutrones.

Como un patinador que encoge los brazos para girar más rápido, la conversión de la estrella en un objeto pequeño y compacto aumenta enormemente su velocidad de giro. Si antes giraba sobre su eje una vez cada varios días o semanas, tras el colapso la rotación aumenta muchas vueltas por segundo, a consecuencia de la ley de conservación del momento angular. Su campo magnético mueve las partículas cargadas que hay en la superficie

de la estrella y las lanza a gran velocidad en la dirección de los polos magnéticos. Para un observador externo, la estrella de neutrones es un emisor de pulsos de energía a intervalos regulares, motivo por el que se les conoce con el nombre de púlsares (estrellas pulsátiles). La regularidad en el periodo de rotación de los púlsares es tan extraordinaria que rivaliza con la precisión de los mejores relojes atómicos construidos por el hombre.

Los alrededores de un púlsar constituyen un entorno hostil para toda forma de vida conocida. Allí, la propia existencia de planetas girando a su alrededor parece algo fuera de lugar. Y sin embargo, fue en un púlsar donde se hallaron algunas de las primeras evidencias relativas a la existencia de planetas extrasolares.

En 1990 el gigantesco radiotelescopio de Arecibo buscaba señales de púlsares con periodos de rotación de milisegundos. Uno de ellos, conocido como PSR B1257+12, parecía mostrar algunas irregularidades. Los demás púlsares hallados hasta la fecha mostraban periodos de rotación extraordinariamente regulares, y también sucedía así en este caso. Un análisis preciso del periodo de rotación mostró, sin embargo, que dicho periodo no era totalmente fijo, sino que parecía variar levemente. Un fenómeno producía variaciones en la llegada de los pulsos de radio a la Tierra. Su descubridor, el astrofísico polaco Alexander Wolszczan (n. 1946), concluyó que la fuente más plausible de las variaciones era la presencia de dos exoplanetas orbitando alrededor del púlsar y con masas que cuaduplican la terrestre. Posteriores observaciones revelaron la existencia de un tercer planeta con una masa 44 veces inferior a la de la Tierra, apenas el doble que la Luna. Se trata del exoplaneta más ligero detectado hasta la fecha, toda una hazaña considerando que se encuentra a más de 2300 años-luz de distancia.

La técnica que permite detectar exoplanetas mediante el estudio de anomalías en el periodo de rotación, conocida con el nombre de cronometraje (*timing*), es asimismo aplicable a algunos tipos particulares de estrella, las conocidas como variables ZZ Ceti, un tipo de enanas blancas cuya luminosidad varía de forma regular. Un tercer tipo de objeto cósmico, llamado sdB (subenana B), es a su vez candidato para una búsqueda de cro-

HOMBRECILLOS VERDES

En julio de 1967, la física británica Jocelyn Bell Burnell, recién graduada, trabajaba en su tesis doctoral sobre fuentes de ondas de radio celestes. Entre las señales recogidas por su radiotelescopio halló una tan estable y regular que, en un principio, creyó que podía ser causada por alguna sonda espacial. Las investigaciones posteriores mostraron que la fuente, un objeto de unos 500 km de diámetro, se encontraba a más de dos mil años-luz de la Tierra, y que emitía energía en radiofrecuencia como si fuese un radiofaro con un periodo de 1,337280 segundos. No se conocía fenómeno natural alguno capaz de producir pulsos de radio de forma tan exacta y, en un principio, Burnell bautizó el objeto recién descubierto como LGM-1. Parece un código como cualquier otro usado en astrofísica, pero tenía un significado oculto: son las iniciales en inglés de *Little Green Men*, «hombrecillos verdes».

Cuestión de pulso

Cuando el descubrimiento fue publicado en la revista *Nature* en febrero de 1968, la explicación fue mucho más prosaica: se trataba de una estrella de neutrones pulsátil, el primero de una nueva clase de objetos conocidos como púlsares (véase la imagen). Como resultado del descubrimiento, Burnell obtuvo su doctorado y Antony Hewish (n. 1924), su director de tesis, fue galardonado con el premio Nobel de Física en 1974 por «su papel decisivo en el descubrimiento de los púlsares».



Púlsar en la nebulosa del Cangrejo.

nometrage y, de hecho, ya se han descubierto planetas alrededor de dos subenanas B, las estrellas V391 Pegasi y HW Virginis.

Existe la posibilidad de que esta técnica también pueda aplicarse a sistemas de estrellas binarias normales y corrientes. Si

una de las estrellas eclipsa a la otra a intervalos regulares, la frecuencia con que ello suceda puede servir como señal o «pulso», y sus variaciones podrían mostrar la presencia de planetas extrasolares. En la actualidad se trabaja activamente en este campo, lo que hace suponer que la contribución de las técnicas de cronometraje al descubrimiento de planetas extrasolares será mayor en el

futuro. Por el momento, el botín es valioso pero algo escaso: 23 planetas, un magro 1% del total.

Desde el descubrimiento de HD 114762 b en el año 1989, las técnicas descritas han permitido descubrir más de dos mil nuevos planetas, lo que representa un fuerte contraste frente a los nueve que se conocían en ese momento. Ahora disponemos de datos suficientes para saber si los planetas de nuestro sistema solar son representativos, o si, por el contrario, vivimos en un sistema planetario atípico. Ha llegado la hora de establecer una clasificación planetaria acorde con los nuevos descubrimientos.

JOCELYN BELL BURNELL

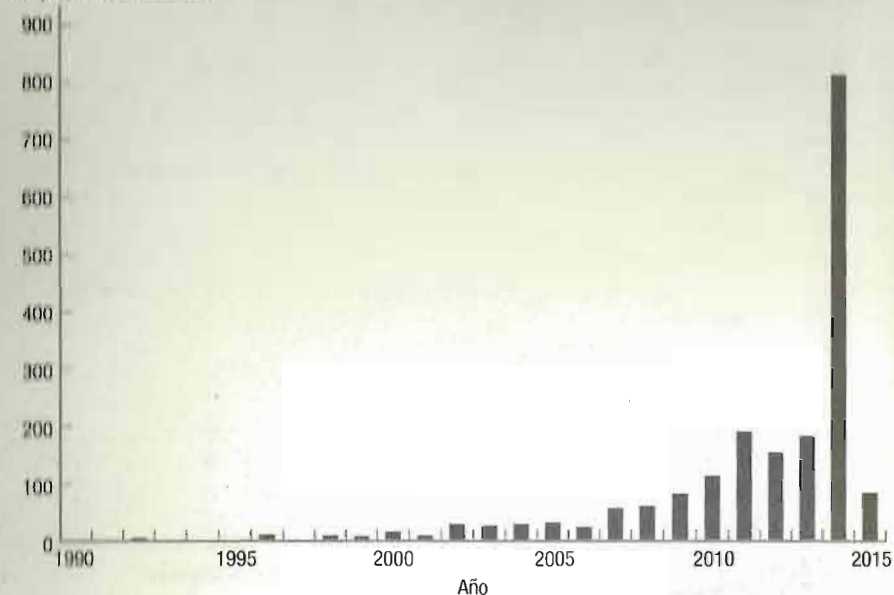
Enciclopedia planetaria

Al descubrimiento y confirmación de mil trescientos sistemas exoplanetarios, le sigue una ingente tarea: clasificarlos y analizarlos. Muy pocos de los mundos descubiertos son similares a la Tierra, pero quizá haya más. ¿Y si resulta que no los encontramos porque son demasiado pequeños para vislumbrarlos? Habrá que seguir buscando.

A comienzos de los noventa, los astrofísicos confiaban que, con los equipos técnicos avanzados y algo de suerte, quizá podrían conseguir detectar algunos exoplanetas alrededor de estrellas cercanas. Y así fue: dos décadas después, los planetas conocidos fuera del sistema solar se contaban por centenares (figura 1). En el momento de escribir estas líneas, la base de datos *exoplanets.eu* lista un total de 2111 planetas extrasolares agrupados en 1354 sistemas planetarios, que se extienden a distancias de entre 4,2 y 27700 años-luz de nosotros. Mientras que algunos son apenas más masivos que nuestra luna, otros se aproximan al estatus de estrella enana marrón. Sus radios varían entre 2000 y 200000 km. En el proceso, se ha tenido que crear una nueva taxonomía planetaria.

La clasificación aplicable a nuestro sistema solar es sencilla. Tenemos planetas rocosos interiores (desde Mercurio hasta Marte), gigantes gaseosos (de Júpiter a Neptuno), cuerpos transneptunianos (Plutón y similares) y una diversidad de objetos de diverso tamaño entre los que se cuentan los asteroides y los cometas. La variedad de exoplanetas descubiertos es tan grande, que las posibilidades para su clasificación son

Exoplanetas descubiertos



Exoplanetas descubiertos por año mediante las diferentes técnicas de observación. Destaca el incremento de 2014 gracias a los datos proporcionados por el observatorio Kepler.

muy variadas: cuerpos pequeños y grandes, con superficie sólida y gaseosa, calientes y fríos, rocosos y helados, con y sin atmósfera.

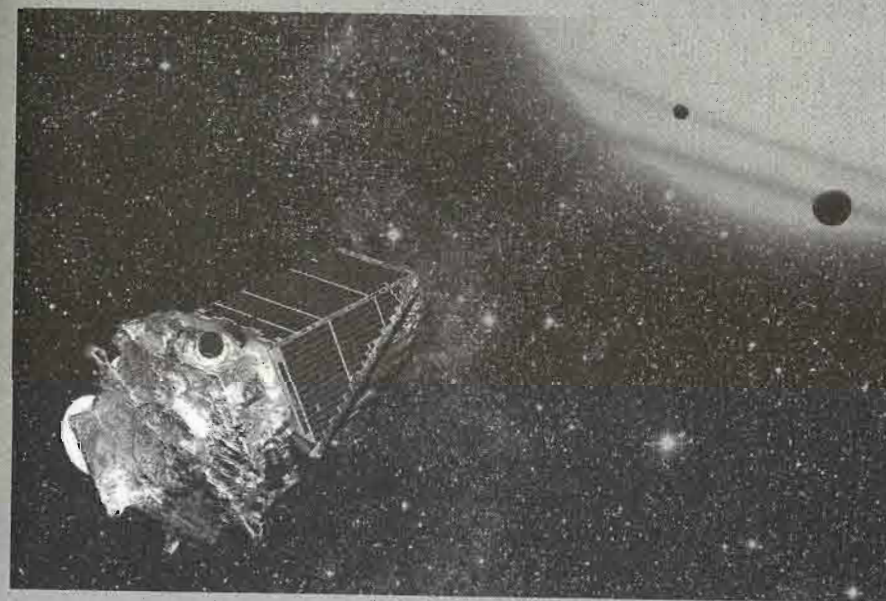
Los exoplanetólogos han comenzado a clasificar y combinar las piezas de este nuevo rompecabezas. Antes de comenzar, hay que tener en cuenta la siguiente advertencia: los exoplanetas detectados no son necesariamente una muestra representativa de los existentes en nuestra galaxia. Las técnicas de detección actuales están por lo general sesgadas hacia objetos grandes y masivos, más fáciles de observar. Teniendo en mente este y otros posibles sesgos de observación, podemos comenzar a clasificar los planetas extrasolares que han sido detectados hasta la fecha.

NUEVA VIDA PARA KEPLER

Desde su puesta en órbita en marzo de 2009, el observatorio espacial Kepler (recreado en la imagen), diseñado para buscar planetas en otros sistemas solares, cumplió con creces las expectativas de los astrofísicos. El resultado fue la detección y posterior confirmación de casi un millar de planetas extrasolares. Concluidos sus objetivos principales, la NASA decidió, en noviembre de 2012, prolongar la vida de Kepler, aunque ya entonces mostraba signos de vejez. Uno de los cuatro giroscopios que sirven para estabilizar y apuntar la nave había fallado en julio, y otro dejó de funcionar en mayo de 2013. Con solo dos giroscopios, Kepler ya no podía seguir investigando la región del cielo que tenía asignada. Pero la NASA no se dio por vencida y buscó nuevas formas de mantener el observatorio en funcionamiento. La solución consistió en usar la presión de la radiación solar: como los fotones procedentes del Sol impactan en diferentes lugares de la estructura del satélite, su efecto podía combinarse con el de los dos giroscopios operativos para orientar la nave.

Una segunda oportunidad

Aunque la precisión ha disminuido, la nueva misión, denominada K2 Segunda Luz, permitirá continuar la búsqueda en otras regiones del cielo algún tiempo más. Kepler ha descubierto la mitad de los más de dos mil exoplanetas confirmados hasta ahora, y la evaluación futura de los datos que ha enviado hace prever que la cifra aumentará en el futuro.



Recreación artística del observatorio espacial Kepler, orientado hacia un sistema planetario extrasolar.

LOS MÁS GRANDES: PLANETAS TIPO JÚPITER

Los planetas más grandes reciben la denominación de *planetas tipo Júpiter*. Se trata de cuerpos con masas similares o superiores a la de Júpiter o Saturno, pero por debajo del límite de las subenanas marrones. Comparten algunas características con estas, como su estructura o la existencia de una gruesa atmósfera.

Los métodos de tránsito y de velocidad radial, que han sido utilizados para detectar más del 90% de los exoplanetas conocidos actualmente, tienden a detectar objetos de gran masa cercanos a sus estrellas y, por ello, muchos de los primeros objetos extrasolares descubiertos fueron planetas tipo Júpiter pero tan cercanos a su estrella como el planeta Mercurio a nuestro Sol. Una cercanía tal implica una alta temperatura, lo que hizo que este tipo de exoplanetas recibiera la denominación de *Júpiter caliente*.

Las ideas que se tenían sobre la formación de nuestro propio sistema solar indicaban que los cuerpos tipo Júpiter solamente pueden formarse lejos de su estrella, en tanto que los cuerpos más cercanos (Mercurio a Marte) son incapaces de mantener una gruesa atmósfera como la de los gigantes gaseosos. El descubrimiento de los júpiteres calientes fue, por tanto, toda una sorpresa. Las teorías actuales sugieren que un Júpiter caliente se forma en el exterior de su sistema planetario y que, con posterioridad, se desplaza poco a poco hacia órbitas más interiores debido a interacciones entre el planeta y el disco protoplanetario que lo ha creado, un proceso que se conoce con el nombre de *migración*. El resultado es una nueva órbita mucho más ceñida a su estrella.

Un Júpiter caliente tendrá una temperatura de varios cientos de grados. La influencia gravitatoria debida a su estrella lo someterá a intensas fuerzas de marea, fruto de las cuales el planeta tenderá con el tiempo a presentar siempre la misma cara a su sol, de forma similar a como la Luna muestra siempre la misma cara a la Tierra. Tendremos una cara iluminada mucho más caliente que la otra, lo que generará vientos de gran intensidad. La atmósfera se expandirá fruto de las altas temperaturas y, si el planeta se encuentra muy cercano a su estrella, esta podría arrancarle parte de su gruesa capa de gases. Un ejemplo típico de

Júpiter caliente es 51 Peg b (recreado en la imagen superior de la pág. 103), uno de los primeros exoplanetas detectados. Orbita la estrella 51 Pegasi a una distancia de 7,8 millones de kilómetros, y tiene aproximadamente la mitad de la masa de Júpiter y el doble de su tamaño.

Algunos de los júpiteres calientes han sido analizados espectroscópicamente para averiguar la composición de su atmósfera, y han revelado que tienen menos

agua de la prevista. El resultado fue sorprendente, ya que el agua es uno de los compuestos más abundantes en el universo. Para explicarlo surgieron dos posibilidades: o los discos protoplanetarios que generaron esos planetas eran pobres en agua, o bien sí que disponen de ella en abundancia pero no puede ser detectada por-

que queda enmascarada por capas de nubes o niebla. Recientes estudios han proporcionado pruebas en favor de la segunda hipótesis. Lo llamativo del caso es que, dadas las altas temperaturas de estos júpiteres, la «niebla» existente está formada por silicatos y hierro fundido.

Con el tiempo se descubrieron planetas tipo Júpiter a mayores distancias, algunos de ellos más lejanos a su estrella que el propio Júpiter a nuestro Sol. Este tipo de cuerpo es ahora conocido como *Júpiter frío*, o sencillamente *planeta tipo Júpiter*. Sus características (tamaño, masa, atmósfera) son similares a las del Júpiter caliente, y la única diferencia básica es la mayor distancia a la estrella y, en consecuencia, su menor temperatura superficial.

Sean calientes o fríos, existen planetas tipo Júpiter caracterizados por una órbita extrema: en ciertos tramos de su trayectoria se aproximan mucho a su estrella, y luego se alejan muchísimo, como algunos de los cometas de nuestro sistema solar. La órbita que siguen estos cuerpos es una elipse, similar a una circunferencia que hubiese sido estirada, y el parámetro que indica ese estiramiento se denomina excentricidad, motivo por el cual un planeta con esas características recibe el apelativo de *Júpiter excéntrico*.

¿Existen muchos mundos o no hay más que un único mundo? Esa es una de las cuestiones más nobles y excitantes en el estudio de la naturaleza.

ALBERTO MAGNO, SACERDOTE Y FILÓSOFO
DEL SIGLO XIII

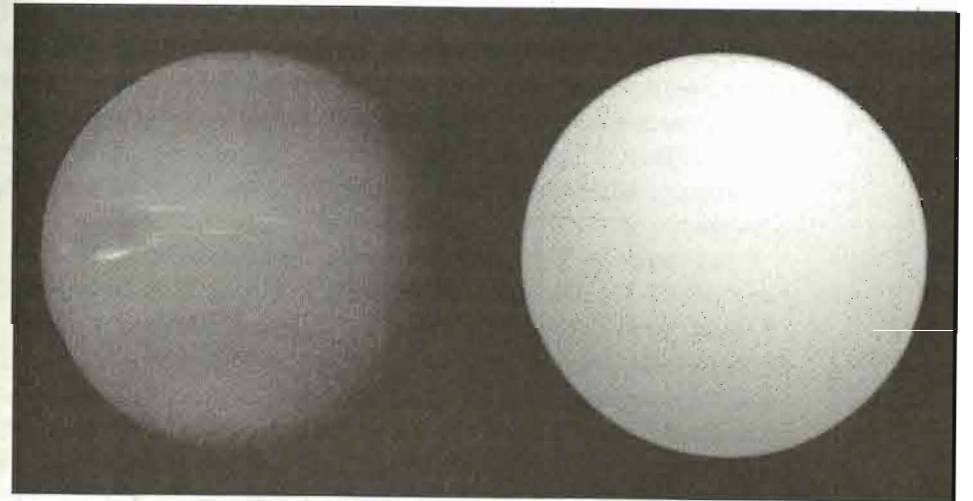
Si nuestro Júpiter fuese excéntrico, su órbita cruzaría la de los planetas interiores y barrería toda la materia que encontrase, de forma que, en realidad, los planetas interiores no podrían existir. ¿Cómo se explica, pues, la existencia de un Júpiter excéntrico? Hasta hace algunos años, sencillamente, no se admitía siquiera su existencia, pero lo cierto es que al menos el 5% de los exoplanetas descubiertos hasta la fecha son de ese tipo. Debe haber algún mecanismo capaz de alterar la órbita de un gigante gaseoso.

El modelo del *Júpiter saltarín* puede ser la explicación. Supone la existencia de tres o más gigantes gaseosos formados a partir del disco protoplanetario. Las interacciones mutuas entre ellos dan como consecuencia un sistema inestable, lo que afectará a sus trayectorias, que se harán cada vez más excéntricas, hasta que las órbitas se crucen. Con el tiempo, uno de los júpiteres abandonará el sistema planetario y los otros dos cuerpos adoptarán órbitas estables muy distintas: casi circular para el cuerpo más cercano a la estrella, excéntrica para el más alejado.

El caso más extremo es el de la estrella HD 20782 b, un Júpiter caliente descubierto en 2006. Se encuentra a unos 400 millones de kilómetros de su estrella, en el punto más lejano de su órbita, pero llega a acercarse hasta solo seis millones de kilómetros. Otros júpiteres calientes están siendo estudiados en detalle para intentar hallar más detalles de sus capas superiores, lo que proporcionaría datos que podrían ser contrastados con modelos atmosféricos avanzados. Ello haría posible progresar en un nuevo campo de trabajo: la *climatología exoplanetaria*.

PLANETAS TIPO NEPTUNO: MÁS MASIVOS QUE LA TIERRA, MENOS QUE JÚPITER

Cuando la masa de un exoplaneta es inferior a la mitad de la de Saturno, tenemos un cuerpo que, si bien es más masivo que la Tierra, es demasiado ligero para considerarlo similar a un gigante gaseoso. El Júpiter caliente da paso a otro tipo de exoplaneta: el *tipo Neptuno* (véase la imagen inferior de la página contigua). Se trata ahora de una clase de planeta con una masa entre 10 y 50 ve-



Arriba, recreación artística de 51 Pegasi b, un ejemplo de planeta tipo «Júpiter caliente», llamado así por su gran masa y su cercanía a la estrella a la que orbita, lo que significa que su superficie debe soportar temperaturas muy elevadas. Gliese 436 b (abajo, a la derecha) es un ejemplo de planeta tipo Neptuno. Es tan solo un 30% más masivo que su «primo» del sistema solar, como se aprecia en la imagen comparativa.

res la de la Tierra (la masa de Neptuno es 17,2 veces mayor que la terrestre). Igual que los exoplanetas tipo Júpiter, los tipo Neptuno detectados al principio se encontraban a corta distancia de su estrella, lo que los convertía en «neptunos calientes» (luego fueron detectados los «neptunos fríos», situados a mayor distancia). Un ejemplo típico es el planeta Gliese 436 b, con una masa un 30% superior a la de Neptuno, que gira a poco más de cuatro millones de kilómetros de su estrella. Es decir: un Neptuno caliente.

MININEPTUNOS Y SUPERTIERRAS

Nuestro sistema solar tiene dos planetas tipo Neptuno: el propio Neptuno y Urano, ambos bastante similares. Tras ellos, el siguiente cuerpo en orden decreciente de masa es muy diferente, pues está formado por un núcleo rocoso y una atmósfera mucho más tenue. Nos referimos a nuestro propio planeta, la Tierra.

Conforme se fueron descubriendo planetas cada vez menos masivos, se hizo patente la necesidad de crear nuevas categorías. En primer lugar tenemos el *minineptuno*, un cuerpo similar al planeta tipo Neptuno pero de menor masa, entre 10 y 20 veces la terrestre. Como sus compañeros masivos, los neptunos y los jupíteres, son cuerpos formados por un núcleo rocoso y un grueso manto de gas, fundamentalmente hidrógeno y helio. En su interior podrían encontrarse capas de gases licuados o incluso sólidos.

Estrictamente hablando, los minineptunos serían un subconjunto de los neptunos. Su importancia radica en que se encuentran en la frontera que separa a los neptunos de una nueva e interesante clase de objetos. Se trata de planetas con masa entre dos y diez veces la terrestre, lo bastante aproximada a la masa de nuestro planeta como para recibir el nombre de *supertierras*. A pesar de ello, no hay que presuponer que una supertierra tiene la misma estructura, composición o grado de habitabilidad que la Tierra.

Los primeros planetas extrasolares detectados fueron precisamente supertierras. El púlsar PSR B1257+12 tiene un sistema

multiplanetario que incluye las supertierras PSR B1257+12 c y PSR B1257+12 d, con masas de 4,1 y 3,8 veces la terrestre, respectivamente. La distancia a la que se encuentran (más de dos mil años-luz) nos impide conocer datos sobre su tamaño o temperatura, pero en cualquier caso las condiciones ambientales del púlsar hacen improbable la existencia de vida tal y como la conocemos.

Lo cierto es que la mera existencia de un planeta alrededor de un púlsar es un desafío para el sentido común.

Los púlsares son estrellas de neutrones, nacidas tras la explosión de una supernova. Incluso el planeta más lejano de su sistema quedaría afectado, y la mayoría de ellos serían destruidos tras la explosión. Sin embargo, los planetas del sistema PSR B1257+12 se encuentran más cerca de su púlsar que Venus de nuestro Sol. ¿Cómo pudieron sobrevivir?

Existen dos conjeturas al respecto: o bien los planetas encontrados son los restos rocosos de planetas gaseosos gigantes, o bien se formaron tras la explosión de supernova que dio origen al púlsar. Esta última posibilidad se consideró poco probable en un principio, pero en 2006 el telescopio espacial Spitzer de la NASA halló evidencias de la existencia de un disco de polvo alrededor del púlsar 4U 0142+61. Por lo que parece, la formación de planetas es tan habitual que casi parece inevitable.

TIERRAS MUY LEJANAS: EXOTIERRAS

Es perfectamente posible que una supertierra sea más parecida en estructura a un gigante gaseoso, una especie de mini-mini-neptuno, que a nuestro propio mundo. Con todo, la existencia de cuerpos planetarios extrasolares similares al nuestro, aunque sea en masa, nos permite una cierta esperanza de que puedan ser considerados como tierras en otros sistemas solares. El objetivo último es encontrar un planeta similar a la Tierra, no solo en tamaño sino a una distancia tal que sea habitable, un nuevo

Yo puedo imaginar un infinito número de mundos parecidos a la Tierra, con un jardín del Edén en cada uno.

GIORDANO BRUNO

mundo que nuestros descendientes puedan algún día colonizar. Es decir, una *exotierra*.

En los últimos años se han hecho diversos descubrimientos que nos acercan cada vez más a la exotierra. En 2009 se descubrió Gliese 581 e, un exoplaneta con una masa inferior a dos veces la terrestre. La distancia a su estrella es de apenas cuatro millones de kilómetros, demasiado cerca para poder albergar vida alguna. Poco después se realizó un descubrimiento revelador: Gliese 581 g, unas tres veces más masivo que la Tierra y con un radio orbital de 22 millones de kilómetros. Se trata de una distancia siete veces inferior al radio de la órbita de la Tierra, pero Gliese 581 es una estrella del tipo enana roja, menos brillante que nuestro Sol.

Sus descubridores llegaron a estimar una temperatura superficial de equilibrio para el planeta de -45°C . Quizá algo fría para nuestra comodidad, pero hay que tener en cuenta que nuestra propia Tierra tiene una temperatura promedio de -18°C y que gracias a la existencia del efecto invernadero, esa temperatura aumenta hasta unos confortables $8-10^{\circ}\text{C}$ de media. El sistema estelar Gliese 581 es uno de nuestros vecinos estelares (se sitúa a apenas 20 años-luz de distancia), lo que lo convertiría en un destino prioritario para una futura exploración interestelar.

¿Estamos ante la primera exotierra? Eso se creyó en un principio, pero posteriores observaciones fueron incapaces de confirmar el descubrimiento inicial. Se cree que la señal que dio origen a la posible existencia de Gliese 581 g fue debida a manchas solares en la propia estrella.

En 2012 se detectó una posible exotierra en Alfa Centauri, lo que lo convertiría en el sistema estelar con planetas más cercano a nosotros. Se trata de un sistema formado por dos estrellas: Alfa Centauri A y Alfa Centauri B, a la que probablemente podemos añadir Próxima Centauri, la estrella más cercana a nuestro Sol (existen dudas sobre si está ligada gravitacionalmente a las otras dos, así que no se sabe si el sistema Alfa Centauri es doble o triple). La estrella Alfa Centauri B, una estrella algo más fría que la nuestra, cuenta con un planeta que orbita a su alrededor, a una distancia lo bastante pequeña para que las otras dos estrellas

no interfieran mucho con su órbita. Dicho planeta, llamado Alfa Centauri B b, tiene una masa levemente superior a la de la Tierra y un radio orbital de seis millones de kilómetros.

¿EXISTEN LAS EXOLUNAS?

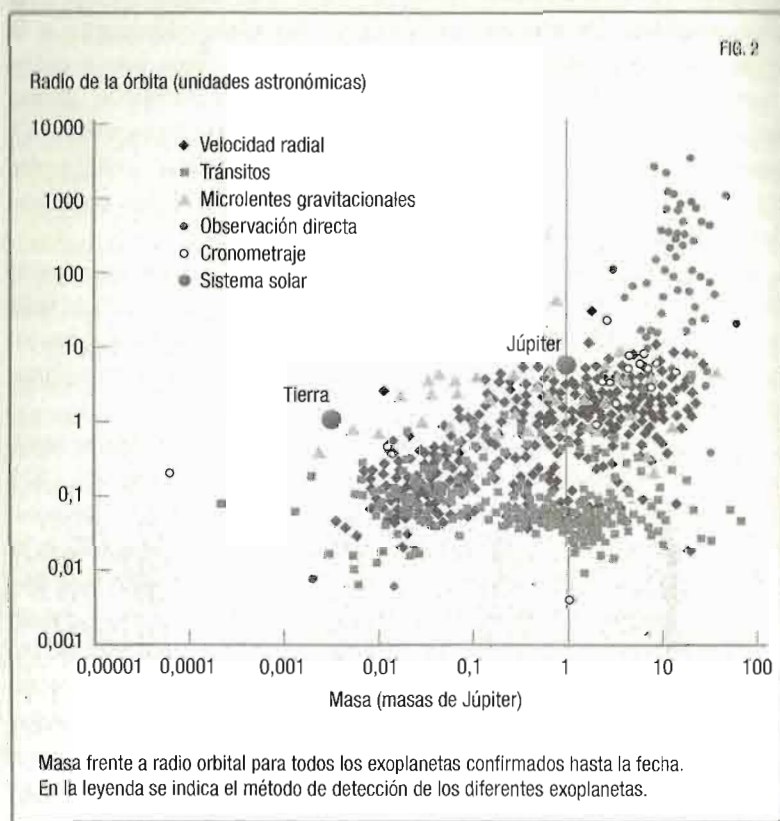
Con la excepción de Mercurio y Venus, todos los demás planetas del sistema solar tienen lunas girando a su alrededor. Algunas son poco más que rocas deformes, pero otras tienen tamaño planetario (Ganímedes, por ejemplo, que gira alrededor de Júpiter, tiene un tamaño similar al de Mercurio). Es de esperar que los exoplanetas descubiertos hasta ahora tengan asimismo sus propios satélites. De ser así, se daría un impulso interesante a la búsqueda de exoplanetas. La atención del público hacia estos cuerpos aumenta cada vez que un equipo de astrofísicos afirma haber descubierto un planeta similar a la Tierra (una exotierra), pensando tal vez en la posibilidad de que allí puedan existir seres inteligentes, o incluso de que dentro de algunos siglos nuestros descendientes puedan visitar esos mundos.

Pero ¿por qué limitarnos a los planetas? En nuestro propio sistema solar los cuerpos más prometedores para encontrar vida son algunos de los satélites que giran en torno a Júpiter y Saturno. Es posible, por tanto, que los cuerpos extrasolares habitables más abundantes sean satélites, no planetas.

Hasta la fecha se han descubierto exoplanetas con masa similar a la de la Luna, pero ninguna exoluna. O... quizá sí. En 2011 un equipo multidisciplinar afirmó haber detectado un objeto orbitando alrededor del gigante gaseoso MOA-2011-BLG-262L b, si bien los datos distan mucho de ser concluyentes. La técnica utilizada (microlente gravitacional) no permite realizar una segunda observación, de forma que este descubrimiento nunca podrá confirmarse o refutarse. Ya se están identificando nuevos candidatos a exolunas, pero los desafíos técnicos son enormes y habrá que esperar al despliegue de observatorios espaciales de nueva generación para confirmar la existencia de lunas alrededor de un planeta extrasolar.

EL CENSO PLANETARIO, UNA TAREA DIFÍCIL

Hacer una clasificación de los exoplanetas descubiertos en función de su masa, radio de la órbita (figura 2), distancia orbital o cualquier otra variable es un ejercicio arriesgado. Los métodos de detección no proporcionan todos esos datos, y, cuando lo hacen, existen fuertes márgenes de incertidumbre. Casi un 40% del total de exoplanetas confirmados ni siquiera tienen masa estimada; de los restantes, aproximadamente la mitad tienen masa conocida, y de la otra mitad solamente se puede dar una cota inferior. Eso nos deja con unos seiscientos planetas cuya masa se conoce, o como mínimo puede estimarse de forma razonable. Según la cla-



PLANETAS TATOOINE

Todo buen aficionado a la saga *Star Wars* conoce la existencia del planeta Tatooine: es el lugar donde transcurre buena parte de la primera película de la serie, *La guerra de las galaxias*. Allí fue donde Luke Skywalker creció antes de marcharse a vivir aventuras a una galaxia muy, muy lejana. El rasgo más característico de Tatooine es su pertenencia a un sistema planetario con dos estrellas.

Sistemas circumbinarios

A comienzos del siglo XXI se hallaron las primeras evidencias reales de un planeta circumbinario, es decir, que gira en torno a dos estrellas simultáneamente. Los datos del observatorio espacial Kepler han permitido descubrir hasta la fecha una decena de ellos. Tres tienen masas inferiores a las de Júpiter y pueden ser clasificados como «tipo Tatooine». El primero en ser descubierto fue el sistema Kepler-16 (recreado en la imagen). Está formado por dos estrellas que giran una alrededor de la otra a una distancia de unos 34 millones de kilómetros; tres veces más lejos, en torno a su centro común de masa, gira Kepler-16 b, un gigante gaseoso. Luego se descubrió el sistema Kepler-34 y, más recientemente, el Kepler-453 b; ambos cuentan con una estrella similar a nuestro Sol y una segunda estrella más débil. Los tres se encuentran a una distancia que permitiría la vida, pero los planetas en sí no son de tipo terrestre sino gigantes gaseosos similares a Júpiter. Aun así, las lunas de esos planetas, en el caso de existir, podrían albergar formas de vida.



Sistema planetario Kepler-16, muy similar a Tatooine, el hogar de infancia de Luke Skywalker.

sificación antes descrita, se reparten aproximadamente de esta forma: 77% de tipo Júpiter; 11% de tipo Neptuno o minineptuno; 11% de tipo supertierra; 1% de tipo exotierra o menor.

Estos datos, es necesario recordar, se basan en procedimientos de observación que resultan más sensibles a los planetas de gran masa, lo que significa que el total de exotierras puede ser mucho mayor que lo que nos indican las observaciones realizadas hasta ahora. Nuestro propio sistema solar tiene un 25% de júpiteres, un 25% de neptunos/minineptunos y un 50% de exotierras. Si fuese una muestra representativa, significaría que quedan muchos exoplanetas pequeños por descubrir; y en cualquier caso, es una máxima del universo que, cuanto mayor es la masa de un tipo de objetos, menor es su abundancia relativa.

Hubo una época en la que los seres humanos tenían la convicción de que vivían en el centro del universo conocido, y resultó no ser cierto. Los descubrimientos astronómicos nos confirmaron que nuestro planeta giraba alrededor de una estrella aburrida, en la periferia de una galaxia corriente de un universo que, según algunas teorías, no sería sino un elemento diminuto de un multiverso extenso más allá de lo imaginable. Hasta hace poco quedaba la incógnita de si nuestro mundo, nuestro sistema solar, era realmente único. Pero la miríada de planetas extrasolares descubiertos y confirmados hasta la fecha es una prueba patente de que no lo es.

Poco a poco hemos descendido en importancia frente al cosmos, pero aún nos queda un rasgo que hace a nuestra Tierra única: es el único lugar conocido que alberga vida. Ahora que hemos encontrado centenares de nuevos mundos, y con la esperanza de muchos más por descubrir, ¿qué garantías tenemos de que ninguno de ellos pueda contener vida? En realidad, ninguna.

Lo cierto es que, en el fondo, deseamos que haya otros mundos habitables. Los lectores de un periódico y los espectadores de un informativo no prestan atención a los nuevos júpiteres pero se emocionarán ante la posibilidad de hallar una nueva Tierra, un gemelo de nuestro propio mundo que algún día, en un futuro lejano, podamos visitar. El examen de la viabilidad de la vida en otros planetas es ahora una posibilidad real.

Exoplanetas y vida

La búsqueda de planetas lejanos no es solo un ejercicio intelectual. Plantea cuestiones profundas, como la posibilidad de que haya vida en ellos, qué métodos emplear para detectarla y cómo desvelar la incógnita de su fundamento químico. Sin olvidar la más básica de las preguntas: ¿qué es la vida?

Aunque el planeta Venus es, por su masa y tamaño, muy similar a la Tierra, su cercanía al Sol lo hace inhabitable. Marte, más alejado, ha perdido casi toda su atmósfera y resulta demasiado frío. A una distancia intermedia, la Tierra nos resulta confortable, pero si hubiera estado un poco más lejos o un poco más cerca, sería tan inhóspita como sus planetas vecinos. Las condiciones de habitabilidad de un planeta dependen, por tanto, de la distancia a su estrella. Pero ¿qué es un planeta habitable? La idea básica es suponer que la condición de habitabilidad implica la existencia de vida tal y como la conocemos, basada en el agua y el carbono, lo que excluiría otros tipos de existencia más exótica que apenas podemos imaginar.

Incluso restringiéndonos a la vida tal como se presenta en la Tierra, tenemos una gran variedad de ambientes. Existen bacterias capaces de sobrevivir en condiciones extremas, como en un medio acuático de ácido concentrado; en capas subterráneas a centenares de metros de profundidad, aisladas de la luz solar y del oxígeno; en las piscinas de refrigeración de los reactores nucleares; en fuentes oceánicas hidrotermales donde la presión es doscientas veces la de la atmósfera terrestre y la tempera-

tura es superior a la del agua hirviendo; incluso en entornos en los que existe radiación mil veces más intensa que la que puede soportar un ser humano.

Para comprobar la capacidad de supervivencia de seres vivos en el espacio, la NASA lanzó en 1984 el LDEF (*Long Duration Exposure Facility*, «instalación para exposición de larga duración»), un satélite diseñado para estudiar el efecto del ambiente espacial sobre diversas muestras. Su vida orbital, inicialmente planificada para una estancia de seis meses, se alargó de forma inesperada debido al accidente del transbordador espacial Challenger en 1986. Cuando el LDEF fue finalmente recuperado, las semillas de tomate que contenía fueron repartidas entre las escuelas de todo Estados Unidos, donde los estudiantes las usaron en experimentos de laboratorio. El crecimiento de dichas semillas fue normal a pesar de haber permanecido expuestas a seis años de vacío y radiaciones.

Para entrar en materia, en 2003 la NASA y el Centro de Astrobiología (CAB, dependiente del CSIC) realizaron en la cuenca del río Tinto una serie de experimentos útiles de cara a la búsqueda de vida en Marte. En primer lugar se ensayó cómo podrían efectuarse perforaciones para obtener muestras del subsuelo a una determinada profundidad que pudieran ser posteriormente analizadas. Aunque se estima que la superficie marciana es estéril, se cree posible que, a cierta profundidad, protegidos de los rayos ultravioleta del sol y en un ambiente de agua subterránea, existan microorganismos. Como fruto de la colaboración entre ambas instituciones, el vehículo explorador Curiosity, enviado por la NASA al planeta rojo en 2012, incluye entre sus equipos la estación meteorológica REMS (*Rover Environment Monitoring Station*, «estación de monitorización ambiental del rover») desarrollada, por parte española, por el CAB y otras instituciones.

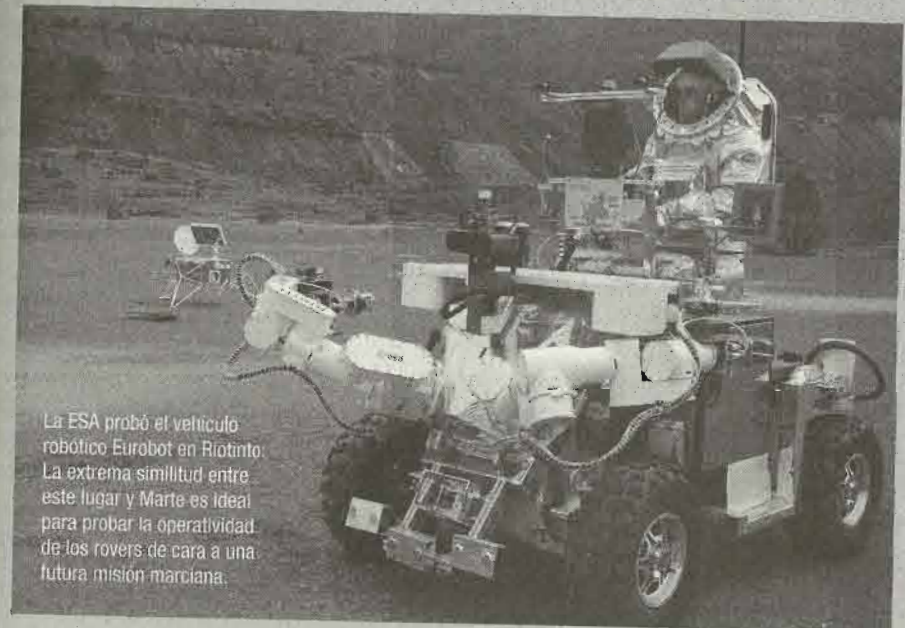
Aunque ningún sensor del Curiosity fue diseñado para detectar vida, la colaboración NASA-CAB continuó con ese objetivo en mente. A mediados de 2015 ambas instituciones anunciaron el proyecto conjunto LMAP (*Life-Detection Mars Analog Project*, «proyecto analógico de detección de vida en Marte»), consistente en una perforadora especial para el suelo marciano capaz de

PLANETA RIOTINTO

Las condiciones de Marte son muy diferentes a las de la Tierra en lo que a albergar vida se refiere, pero las diferencias no son insalvables. Algunos microorganismos terrestres podrían tener una oportunidad en el planeta rojo. Son los llamados organismos extremófilos, capaces de soportar condiciones ambientales que los colocan en el límite de las posibilidades de la vida. Los científicos han buscado diversos lugares donde el ambiente sea lo más hostil posible a la vida con vistas a probar el equipo y las técnicas que podrían usar los futuros exploradores de Marte.

Marte en la Tierra

Uno de estos lugares es el río Tinto, en la provincia de Huelva. A lo largo de cien kilómetros sus aguas recogen y disuelven metales pesados de los yacimientos cercanos. La superficie marciana tiene una composición química y mineralógica similar a la de esta extraordinaria área onubense, lo que convierte este paraje en un campo de pruebas ideal. Aunque el agua del río Tinto es pobre en oxígeno disuelto y su nivel de acidificación es demasiado elevado para casi todos los organismos terrestres, en ella viven diversos tipos de bacterias y otros microorganismos extremófilos, algunos de los cuales tendrían posibilidades de sobrevivir también en Marte. Por dicho motivo se han propuesto diversas iniciativas para explorar y detectar posibles formas de vida en ese planeta.



La ESA probó el vehículo robótico Eurobot en Riotinto. La extrema similitud entre este lugar y Marte es ideal para probar la operatividad de los rovers de cara a una futura misión marciana.

extraer muestras del suelo, junto con un instrumento llamado SOLID (*Signs Of Life Detector*; «detector de signos de vida») diseñado por el CAB para analizarlas en busca de formas de vida. Caso de tener éxito, se espera que LMAP formará el núcleo del módulo de aterrizaje IceBreaker, enmarcado en una futura misión no tripulada a Marte. Los candidatos a futuros exploradores marcianos se entrenan ya en busca de vida.

Dado que algunas formas de vida logran sobrevivir en nuestro planeta en una amplísima variedad de condiciones ambientales, muchas de ellas extremas, definir qué es un planeta habitable resulta difícil de responder. Los científicos han zanjado la cuestión fijando un criterio que, si no riguroso, resulta cuando menos razonable. Puesto que la vida sobre la Tierra se basa directa o indirectamente en el agua, se considera que un planeta es potencialmente habitable cuando puede albergar agua en estado líquido. Esta condición define una región alrededor de la estrella donde eso es posible. A dicha región se la denomina *zona circunsolar habitable* o *zona de habitabilidad*, pero se la conoce de manera más común con el nombre de *zona Goldilocks* o, en español, *zona Ricitos de Oro*.

El nombre proviene del cuento *Ricitos de Oro y los tres osos*, en el que una niña se pierde en el bosque y acaba en una cabaña vacía en la que habitan una pareja de osos y su hijo, todos de distinto tamaño y distintas preferencias. Todo lo que hay en la cabaña está repetido en tres variantes. Hay tres cuencos de comida, uno está muy frío, otro está muy caliente y un tercero está templado; de las tres camas existentes, una es demasiado grande, otra demasiado pequeña y la otra es justo del tamaño de la niña. Para la protagonista del cuento, siempre hay dos opciones extremas mientras que solo una es «la justa» para ella. De forma análoga, un planeta situado muy cerca de su estrella será demasiado caliente para albergar agua líquida, y otro que se halle muy lejos, será demasiado frío. Solo en un punto a mitad de camino entre el efecto invernadero y la glaciación masiva, un cuerpo dentro de la zona adecuada tendrá la temperatura «justa» para el florecimiento de la vida.

La ubicación y grosor de la zona Goldilocks (véase la imagen de las pág. 118-119, que muestra la zona de habitabilidad de tres

sistemas planetarios) depende del tipo de estrella: cuanto más brillante, mayor será la luz emitida y más lejos estará situada la zona de habitabilidad. No obstante, el hecho de que un planeta orbite dentro de la zona Goldilocks no lo convierte automáticamente en habitable. Un planeta con una órbita muy elíptica permanecería fuera de su zona de habitabilidad durante parte de su trayectoria, y un mar que cada pocos meses se congelara o se evaporara no sería un buen hogar para la vida.

También existe el problema del acoplamiento de marea. Al igual que la Luna presenta siempre la misma cara a la Tierra, las fuerzas gravitatorias hacen que, con el tiempo, le suceda lo mismo a un planeta. Un mundo acoplado con su estrella sería una pesadilla bipolar, con una cara siempre de día y otra siempre de noche. Resulta difícil imaginar el desarrollo de vida en un cuerpo así, aunque algunos descubrimientos sugieren que un planeta acoplado podría mitigar las temperaturas extremas si dispusiese de una atmósfera capaz de transportar calor entre ambos hemisferios.

Las dificultades no han terminado. Una estrella capaz de albergar vida ha de tener una luminosidad aproximadamente constante, o de otro modo las variaciones producirían fuertes alteraciones climáticas. El planeta debe disponer de una magnetosfera capaz de desviar las partículas energéticas del viento solar, así como de una protección adecuada contra la radiación ultravioleta; asimismo resulta poco aconsejable que el sistema planetario incluya estrellas en fase pre-nova, púlsares u otros emisores de radiaciones letales, o bien que se encuentre en una zona galáctica particularmente hostil a la vida.

En cualquier caso, la zona Goldilocks no debe tomarse como un criterio inflexible de habitabilidad, ya que la posibilidad de albergar agua líquida depende hasta cierto punto de las características del propio mundo. La mayoría de las estimaciones dan a nuestro Sol una zona de habitabilidad que se extiende desde las cercanías de Venus hasta prácticamente la órbita de Marte, pero

¿Qué la vida solo puede existir en la Tierra? Eso es como llenar una taza con agua de mar y afirmar que no hay ballenas en el océano.

NEIL DEGRASSE TYSON

El exoplaneta Kepler-186 f pertenece al sistema Kepler-186, del mismo modo que el Kepler-452 b forma parte del sistema del mismo nombre. Como la Tierra, orbitan alrededor de un astro central en un rango parecido de zona habitable. El dato podría ser útil para estudiar mundos parecidos al nuestro. En el sistema solar, la Tierra está en plena zona Goldilocks: ni demasiado cerca ni demasiado lejos del Sol.



Kepler-452 b



Kepler-186 f

SISTEMA KEPLER-100

SISTEMA KEPLER-452

SISTEMA SOLAR

Mercurio

Venus

Tierra

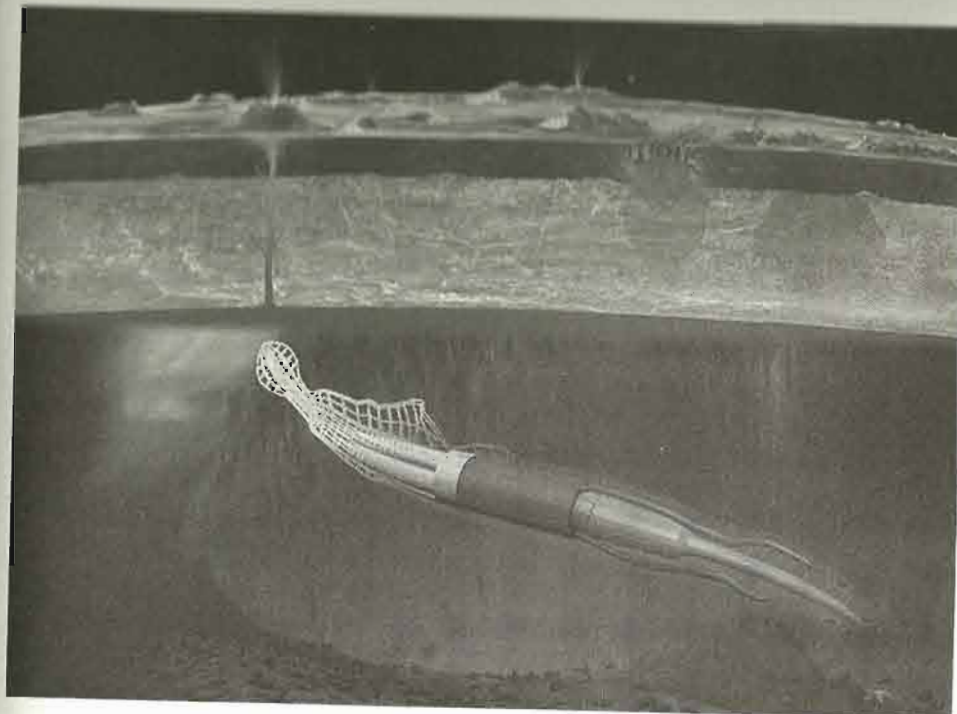
Marte

en la actualidad ninguno de esos planetas puede tener agua líquida. La atmósfera de Venus, formada por dióxido de carbono a una presión 92 veces superior a la terrestre, somete al planeta a un calentamiento global masivo hasta el punto de que su superficie es más caliente que el plomo derretido. En cuanto a Marte, su escasa gravedad impide que el vapor de agua permanezca en su atmósfera, y si bien hay abundantes indicaciones de que un día albergó océanos en su superficie, en la actualidad es un planeta seco.

Algunos científicos no creen que las condiciones definidas por la zona Goldilocks sean un criterio de habitabilidad adecuado y denominan «*chauvinismo planetario*» al prejuicio de considerar que solamente un planeta a cierta distancia de su estrella es capaz de desarrollar vida. Las exploraciones espaciales no tripuladas han añadido varios cuerpos no planetarios a la lista. Los candidatos más prometedores son algunos satélites en órbita alrededor de los gigantes gaseosos. Se cree que Europa (la imagen superior de la página contigua recrea una hipotética sonda de exploración de sus mares) y Calisto, dos lunas de Júpiter, y Encélado, satélite de Saturno, poseen una capa de agua líquida por debajo del manto de hielo. Titán, la luna más grande de Saturno, carece de agua líquida, pero dispone de metano líquido y otros hidrocarburos que quizá hagan posible la existencia de vida en ausencia de oxígeno. Aunque tanto Júpiter como Saturno están fuera de la zona Goldilocks, existen al menos dos mecanismos capaces de suplir la energía proporcionada por el Sol: el calor generado por fricción durante el proceso de mareas (la energía orbital y la rotacional se disipan en forma de calor) y la presencia de materiales radiactivos en el interior de las lunas.

PLANETAS GOLDILOCKS

Tomando las debidas precauciones, los astrofísicos están buscando exoplanetas situados en una zona de habitabilidad. Algunos de los casos más prometedores fueron descubiertos por el observatorio orbital Kepler en 2013. Dos de ellos, Kepler-62 e y Kepler-62 f, son ejemplos de supertierras, planetas con masas



Puede que el mar interior de Europa, una de las lunas de Júpiter, sea un lugar propicio para hallar vida fuera de la Tierra. Para ello, la NASA proyecta esta sonda robótica (arriba) con forma de calamar. El exoplaneta Kepler-452 b, aquí recreado artísticamente, tiene unas dimensiones parecidas a las de la Tierra y orbita dentro de la zona de habitabilidad de su sol, una enana amarilla de tipo G2.

aproximadamente 35 veces mayores que la de la Tierra. Una tercera supertierra, llamada Kepler-442 b, tiene un radio similar al de los planetas anteriores, aunque su masa no ha podido ser determinada. Poco después, en 2014, se hicieron públicos los parámetros de Kepler-186 f. Su tamaño es apenas superior al de la Tierra, lo que levantó expectación. Ya no estábamos hablando de gigantes tipo Júpiter ni de supertierras, sino de un planeta con tamaño similar al nuestro, ubicado en su zona de habitabilidad.

A pesar de las semejanzas existentes entre los nuevos planetas Goldilocks y la Tierra, todavía queda un escollo para poder considerarlos nuestros gemelos. Las estrellas respecto a las que orbitan tendían a ser del tipo K o enana blanca, mucho más pequeñas y menos brillantes que el sol terrestre. Pero en julio de 2015 la tendencia cambió gracias a un nuevo descubrimiento: Kepler-452 b, un planeta que gira en torno a una estrella tipo G2 (recreado en la imagen inferior de la página anterior), muy similar a nuestro Sol. Su radio orbital es apenas un 5% superior al terrestre y su año tiene tan solo veinte días más que el nuestro. Se cree que por su tamaño puede tratarse de un minineptuno, quizá una supertierra, pero por ahora se desconoce cuál es su masa.

BIOFIRMAS: EL RASTRO DE LA VIDA

Puesto que la presencia de un planeta en la zona Goldilocks no es garantía de habitabilidad, mucho menos lo será del desarrollo de vida. Podemos descartar que un planeta sea habitable en base a su temperatura (si es demasiado frío o demasiado caliente, Ricitos de Oro no estará confortable) y a algunas propiedades, como su masa o su excentricidad, una variable que cuantifica hasta qué punto la forma de la órbita se aleja de la circunferencia. Imaginemos ahora que hemos encontrado un planeta candidato a albergar vida. ¿Cómo podríamos detectarla? Aunque las enormes distancias interestelares descartan el envío de sondas de investigación, afortunadamente hay una forma de buscar vida en otros planetas: analizando su luz.

Si un exoplaneta cruza por delante de su estrella durante un tránsito, la luz que atraviesa la atmósfera de este se modifica. Podemos examinar esos cambios mediante técnicas de espectroscopía y descubrir la composición de su atmósfera. El objetivo es encontrar algún compuesto que sea producto de la vida, o que, al menos, esté relacionado con la vida tal como la conocemos. La presencia de dichos compuestos, indicios a favor de la existencia de vida, se conoce con el nombre de *biofirma*.

Los exobiólogos han establecido el siguiente catálogo de biofirmas, en orden creciente de asociación a la vida:

- *Dióxido de carbono*. Es sabido que una gran cantidad de seres vivos, incluyendo los seres humanos, espiramos CO_2 . Existen procesos naturales abióticos (no basados en la vida) capaces de generar este gas, así que su detección no implica que el dióxido de carbono de una atmósfera planetaria haya sido generado por seres vivos. Se trata tan solo de un primer paso que nos indica que el planeta tiene una atmósfera.
- *Vapor de agua*. Hasta donde sabemos, el agua es imprescindible para la vida. Por ello es una condición necesaria pero no suficiente. Sin embargo, su presencia es un primer paso para juzgar si un planeta es adecuado para la vida. Es un primer indicador de habitabilidad que debe ir acompañado de otros.
- *Amoníaco y óxido nitroso*. Estos dos gases contienen nitrógeno y, en la Tierra, se generan mediante procesos biológicos. Existen procesos naturales capaces de generarlos en ausencia de vida, pero no en grandes cantidades. Una detección de óxido nitroso y amoníaco en concentraciones apreciables en una atmósfera planetaria sería un indicio fuerte de vida, aunque no concluyente.
- *Metano*. Se trata de un compuesto sencillo constituido por una molécula de carbono y cuatro de hidrógeno. En la Tierra

suele generarse fundamentalmente mediante la actividad de bacterias en el intestino de algunos animales, pero también hay algunos procesos geológicos capaces de producirlo. En 2004, la sonda de la Agencia Espacial Europea Mars Express detectó trazas de metano en la atmósfera de Marte, pero hasta la fecha no se ha encontrado rastro de vida en ese planeta. La existencia simultánea de amoníaco, óxido nitroso y metano sería un indicio muy sólido de la existencia de vida.

- *Oxígeno*. Al igual que otras sustancias, el oxígeno es producido de forma natural y abiótica en el universo. Si algún proceso químico natural produjese cantidades apreciables de oxígeno, este tardaría poco en desaparecer. La única manera conocida de mantenerlo en la atmósfera es generarlo constantemente mediante algún tipo de fotosíntesis, de forma que su detección es un signo prácticamente seguro de vida. Sin embargo, la carencia de oxígeno no significa ausencia de vida. La propia Tierra albergó formas de vida anaerobias (que pueden vivir sin oxígeno) durante casi mil millones de años, hasta que aparecieron las primeras cianobacterias productoras de oxígeno.
- *Ozono*. Se trata de una molécula con tres átomos de oxígeno. Suele producirse en la alta atmósfera, apantallando la radiación ultravioleta, y por la misma razón que el oxígeno, es un buen gas de biofirma; también ayuda a proteger la posible vida de la luz de alta energía procedente de su estrella.
- *Clorofila*. He aquí la biofirma definitiva. Se trata de un pigmento responsable de la fotosíntesis en las plantas, que absorbe parte de la luz solar para producir carbohidratos a partir del dióxido de carbono y el agua; como subproducto, también produce oxígeno. El descubrimiento de clorofila superficial en otro planeta sería una tarea muy difícil, ya que no produciría bandas de absorción detectables espectroscópicamente (aunque podría observarse un enrojeci-

miento de la luz reflejada por el planeta). Por otro lado, es posible que otros planetas desarrollen su propia variedad de molécula tipo clorofila, mejor adaptada a la luz de su propia estrella.

- *Otros*. Existe una variedad de compuestos químicos cuyo origen es principalmente biótico: acetaldehído, acetona, benceno, disulfuro de carbono, disulfuro de dimetilo, sulfuro de metilo, sulfóxido de dimetilo, etanol, etil mercaptán, fluoroacetona, isopreno, metil etil cetona, metil mercaptán, metil vinil cetona, tioglicol, tolueno. Su presencia en concentraciones atmosféricas de decenas a centenares de partes por millón constituirían un indicio de la existencia de vida, pero su detección resulta muy difícil.

La detección de las sustancias consideradas como biofirmas es más sencilla en el infrarrojo, donde sus espectros tienen muchos rasgos identificables. Observar en el rango de ondas milimétricas sería mejor aún, pero los requisitos técnicos son formidables. Para poder observar con la precisión requerida, los telescopios necesitarían tener una abertura del orden de centenas de metros, puede que de kilómetros. Existe también el problema de los falsos positivos, ya que los rasgos característicos de esas sustancias suelen coincidir en la misma región del espectro.

Hasta ahora el estudio de las biofirmas y su potencial utilidad en estudios exoplanetarios se han llevado a cabo en el interior del laboratorio. Su observación en la atmósfera o superficie de un planeta representa, por ahora, un desafío técnico enorme. A pesar de ello, los exobiólogos y los buscadores de planetas extrasolares se preparan para cuando llegue el momento en que la detección de biofirmas sea finalmente posible.

TERRAFORMACIÓN: HACER UN PLANETA A MEDIDA

Dada la gran diversidad de mundos existentes, sería mucho pedir que el planeta objetivo de una expedición extrasolar tuviese

BIOSPHERE 2, EL HÁBITAT ARTIFICIAL

¿Existe alguna forma de mantener una nave espacial tripulada en condiciones habitables, sin dependencia alguna del exterior salvo la luz solar? Para responder esta cuestión la Universidad de Arizona construyó Biosphere 2 (en la fotografía superior de la página contigua), el mayor hábitat cerrado y autosuficiente del mundo (en realidad, el segundo después de la propia Tierra, de ahí el número «2»). En una extensión de algo más de una hectárea en Oracle, Arizona, sus instalaciones albergaban varios ecosistemas naturales, un hábitat humano y una zona para uso agrícola. El alimento, el agua y hasta el aire se reciclaban en su interior, permitiendo la supervivencia de varias personas durante años. Lo único que Biosphere 2 tomaba del exterior era la luz del sol.

Una primera fase problemática

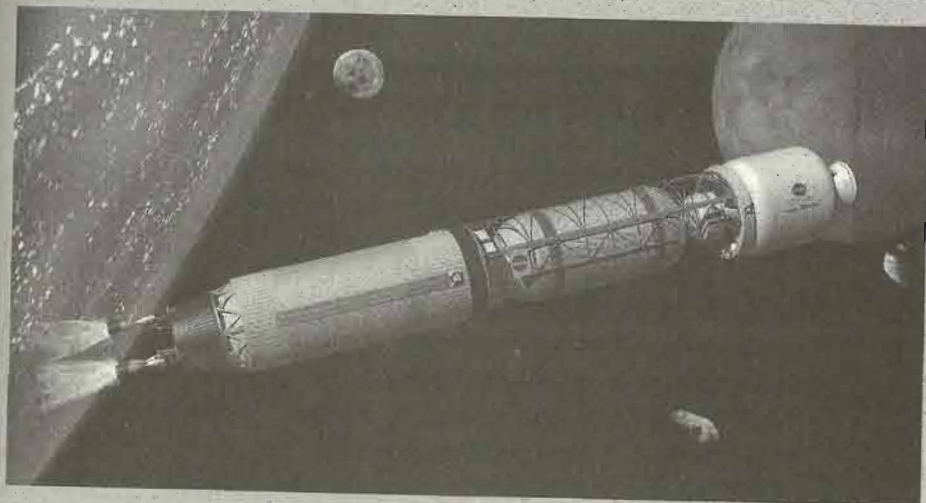
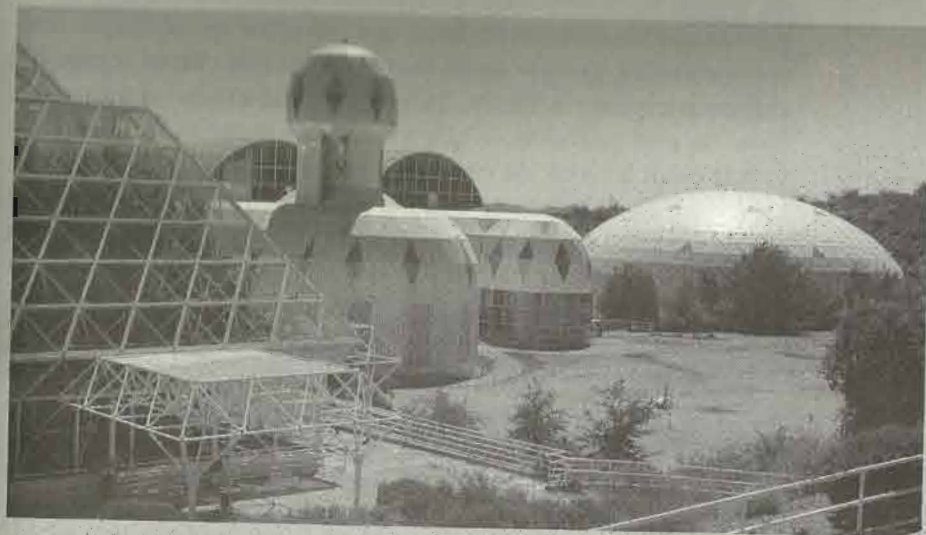
La primera misión comenzó en septiembre de 1991 con una dotación de ocho personas. Durante dos años tuvieron que hacer frente a múltiples problemas: parte del CO_2 fue absorbido por el cemento de la estructura; cucarachas y hormigas se convirtieron en una plaga que arrasó la cosecha de patatas; la humedad produjo problemas de corrosión, y las tareas de mantenimiento fueron más pesadas de lo inicialmente previsto. El hábitat tampoco era tan autosuficiente: los niveles de oxígeno fueron bajando hasta el punto de que los organizadores se vieron obligados a bombear oxígeno del exterior y, al final de la misión, los «biosferanautas» tuvieron que echar mano de sus reservas alimenticias de emergencia para evitar una malnutrición severa. En una ocasión, cuando uno de los miembros del proyecto resultó herido, no solamente se le permitió salir al exterior sino que, al regresar, introdujo nuevo material en un hábitat supuestamente cerrado.

Disputas personales: fracasa la segunda fase

A pesar de los problemas típicos de un primer ensayo, la misión se consideró un éxito y se preparó un segundo intento para 1994. En este caso los problemas principales fueron de índole muy distinta: apenas un mes después de comenzar, los administradores del experimento fueron acusados de mala gestión y apartados del proyecto. Como represalia, dos de los miembros del equipo abrieron varias ventanas para sabotear el experimento, y otros tres miembros, incluido el capitán, tuvieron que ser sustituidos por personal exterior. Esta segunda misión se canceló al cabo de seis meses.

Es posible vivir allí fuera, pero ¿en armonía?

Los experimentos de Biosphere 2 han batido varios récords, y a pesar de las dificultades han demostrado que un conjunto de seres humanos puede, en principio, sobrevivir en un hábitat autosuficiente durante años, lo que acerca algo más la posibilidad de los viajes interplanetarios (en la imagen inferior, una recreación de una futura expedición tripulada a Marte). También revelaron que la cara más oscura del ser humano puede ser el factor limitador en una misión de larga duración: es posible mantener seres humanos vivos en los viajes espaciales, pero no necesariamente en armonía.



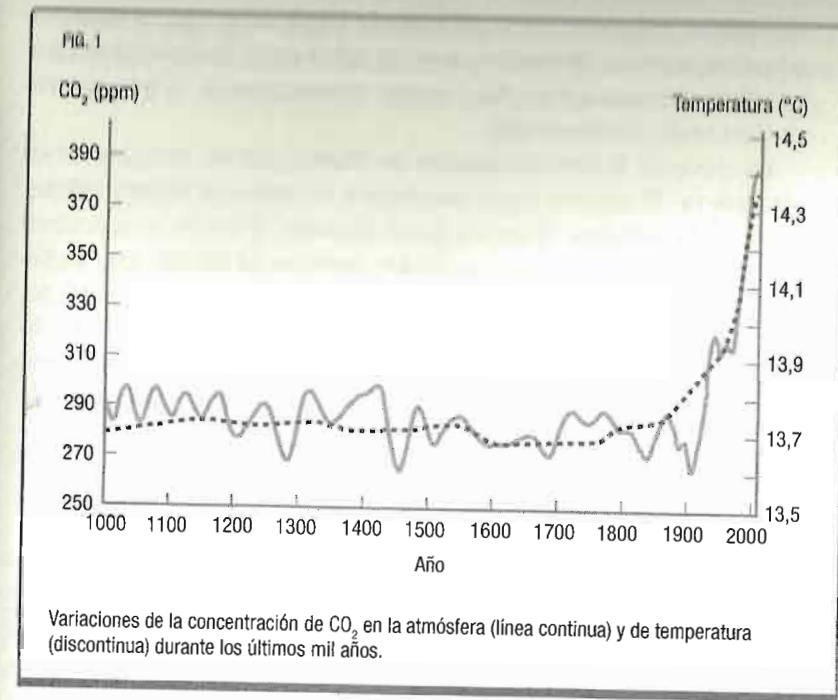
En la foto de arriba, instalaciones del proyecto Biosphere 2. Se observa el «hábitat» (en el centro de la imagen), en el que se alojaba el personal, y uno de los «pulmones» (en forma de cúpula), que permitían mantener la presión del aire en todo el complejo. Abajo, representación artística de una misión tripulada a Marte. Aparte de la complejidad técnica que conllevan dichos viajes, las expediciones de este tipo deberán tener resuelto el problema de la convivencia durante largos periodos de tiempo.

todas las propiedades de nuestro planeta: atmósfera, agua líquida, temperatura adecuada, estabilidad orbital. Por ello lo más seguro es que los colonos tuvieran que convertir en habitables nuevos territorios, porque no se encontrarían con climas o paisajes similares a los de la Tierra. Salvo que la casualidad actuara a su favor, lo más probable es que los nuevos mundos les obligaran a vivir en el interior de cúpulas o en hábitats subterráneos que les permitieran mantener un microclima artificial muy parecido al que tendrían en su nave de transporte. En esas condiciones no tendría mucho sentido hacer tan largo viaje para fundar una nueva sociedad bajo tierra. Eso se podría hacer igualmente en el sistema solar. Entonces ¿para qué ir tan lejos?

En lugar de que los colonos se adaptaran al planeta, ¿por qué no hacerlo al revés y cambiar el entorno del planeta para asemejarlo a nuestra Tierra? Ese es el propósito de la *terraformación*. Se trata de un proceso de gran envergadura, pero conocemos precedentes tanto naturales como antropogénicos. Hace unos 2500 millones de años, las cianobacterias comenzaron a producir oxígeno en cantidades apreciables, liberándolo a la atmósfera y provocando la aparición de la capa de ozono que protege la superficie terrestre de la acción esterilizante de los rayos ultravioleta. Las variaciones en los niveles de CO_2 y los subsiguientes cambios en la temperatura media de la Tierra son fenómenos bien documentados y estudiados, y permitieron que la temperatura global de la Tierra aumentase hasta los valores actuales.

A este cambio climático que hoy afecta a todo el globo estamos contribuyendo los seres humanos. La quema masiva de combustibles fósiles está aumentando la temperatura global de la Tierra a una velocidad sin precedentes (figura 1). Los gases clorofluorocarbonados (CFC) han debilitado la capa de ozono, aumentando con ello la cantidad de radiación ultravioleta que llega a la superficie terrestre, y tanto ellos como el metano son asimismo potentes gases de efecto invernadero.

El cambio climático provocado por el hombre en los últimos cien años, aunque mucho menor que el derivado de fenómenos naturales en el pasado, es lo bastante acusado para que los humanos nos preocupemos por él. Cabe imaginar, por tanto, la posibi-



lidad de desencadenar un cambio climático de forma deliberada en otro planeta. Una capa de dióxido de carbono y metano le vendría muy bien a Marte para retener agua y aumentar su temperatura, y si la gruesa atmósfera de Venus se pudiese reducir, sus temperaturas podrían bajar lo suficiente para sustentar vida.

Cada planeta requeriría un tipo de estrategia de terraformación según sus propias características. Tomemos el ejemplo de Marte, un mundo prácticamente sin agua líquida superficial. Su escasa atmósfera, cuya presión no llega a la centésima parte de la terrestre, es en parte responsable de la extrema variabilidad en las temperaturas: entre 35 °C en verano y -140 °C en invierno. ¿Qué estrategia sería la mejor para terraformar un mundo así? Hace varios miles de millones de años Marte tuvo suficiente agua líquida en su superficie para formar grandes océanos, y los datos recogidos por los orbitadores y los astromóviles (vehículos de superficie) han mostrado que queda algo de agua líquida bajo su

superficie, así como hielo. El planeta también contó en tiempos pasados con una atmósfera, pero la débil gravedad marciana fue insuficiente para retenerla, y como consecuencia, la temperatura disminuyó fuertemente.

La clave de la terraformación de Marte está en reconstruir su atmósfera. El primer paso consistiría en calentar su superficie, y para ello existen diversas posibilidades. Pueden construirse

La ausencia de evidencia
no es la evidencia de ausencia.

CARL SAGAN

grandes espejos orbitales que reflejen la luz del Sol hacia la superficie. Pueden inyectarse en la atmósfera diversos gases para producir un efecto invernadero, como los CFC, que además bloquearían los rayos ultravioleta del Sol. Una posibilidad adicional consiste en bombardear la superficie con asteroides ricos en amoníaco (un potente gas de efecto invernadero) y con cometas compuestos por hielo de agua y CO_2 . Además de todo ello, los brillantes polos marcianos pueden rociarse con partículas de carbón, o incluso bacterias, con objeto de reducir su reflectividad. Una superficie más oscura absorbería una mayor cantidad de luz solar, que posteriormente se convertiría en calor.

En una segunda fase, la temperatura habría alcanzado un valor lo bastante alto como para fundir los polos. Esto sería una gran ventaja, ya que están compuestos en parte por dióxido de carbono, que sería inyectado a la atmósfera. La temperatura continuaría aumentando gracias al efecto invernadero, y la creciente atmósfera ayudaría a mitigar las diferencias extremas de temperatura. Por supuesto, una atmósfera compuesta de dióxido de carbono y amoníaco no es lo más adecuado para la vida tal como la conocemos, así que el siguiente paso sería el envío de grandes cantidades de cianobacterias capaces de liberar oxígeno a la atmósfera.

Con el tiempo, la atmósfera de Marte pasaría a tener una densidad adecuada para el mantenimiento de la vida, con oxígeno para respirar y gases de efecto invernadero que mantuvieran las temperaturas dentro de un rango conveniente. Por supuesto, con esto no todo está hecho, ya que quedarían importantes problemas,

como la baja gravedad o la ausencia de una magnetosfera capaz de preservar la superficie del viento solar; pero el esquema para terraformar un planeta tipo Marte es, al menos en teoría, factible.

VIDA EXÓTICA

Los dos pilares fundamentales de la vida en la Tierra son el agua y el carbono; el primero sustenta la vida, y el segundo, la desarrolla. ¿Cuáles son los motivos? ¿Qué hacen del agua y el carbono sustancias tan especiales? Comencemos por el carbono. Se trata de un elemento relativamente escaso en la corteza terrestre y cuyas propiedades le permiten una gran capacidad para combinarse con otros elementos químicos. Cuando solo forma enlaces químicos con otros átomos de carbono puede dar lugar a un material blando como el grafito, o a una sustancia dura como el diamante. En años recientes se han descubierto nuevas moléculas de carbono que se estructuran en forma de esferas (fullerenos), cilindros (nanotubos) o láminas (grafeno) cuyas propiedades están revolucionando el campo de la física de los materiales.

Sin embargo, es su valor como forjador de vida lo que lo hace tan importante. Un átomo de carbono puede establecer enlaces químicos sencillos con átomos de oxígeno o de hidrógeno para formar dióxido de carbono (CO_2) o metano (CH_4), pero también es capaz de combinarse con más átomos de carbono y de otros elementos para constituir compuestos extraordinariamente complejos, como el ácido desoxirribonucleico (ADN), una molécula compuesta por cerca de un cuarto de billón de átomos.

En combinación con el nitrógeno, el oxígeno, el hidrógeno y otros pocos elementos, el carbono permite formar todo tipo de moléculas, incluyendo las que se necesitan en los complejos procesos que permiten la vida: los carbohidratos, las proteínas, los lípidos, los ácidos nucleicos. No está demostrado que la vida basada en el carbono tenga necesariamente que dar lugar a la aparición de las moléculas orgánicas que forman los organismos vivos en la Tierra, pero sí parece claro que el carbono es vital en la formación de la vida.

Durante la lenta evolución que dio lugar a la vida, las moléculas se crearon y deshicieron en un sustrato, una sustancia que permitió tanto su transporte como su combinación en estructuras más complejas. En nuestro planeta esa sustancia fue el agua. Todos los organismos vivos contienen agua, e incluso las formas de vida desérticas más resistentes la necesitan. Existen algunas bacterias cuyas esporas contienen una cubierta que previene la desecación y les permite vivir indefinidamente de forma latente, pero deben mantener agua en su interior y mueren si la pierden. Incluso los virus, que carecen de agua, dependen para su propagación de otros seres con agua. Una espora de bacteria o un cristal vírico no pueden negar el hecho fundamental: sin agua no hay vida.

¿O acaso estamos siendo demasiado chauvinistas? En base a la evidencia de las observaciones realizadas en nuestro propio planeta, podemos afirmar como mucho que la vida tal y como la conocemos fuera del carbono y del agua es extraordinariamente improbable. El problema de la vida basada en el carbono es que se trata de la única que conocemos, y considerar que toda la vida en el universo ha de ser del mismo tipo sería como creer que todos los planetas han de ser similares a la Tierra.

El átomo de carbono puede combinarse para formar gran cantidad de compuestos gracias, entre otros factores, a su cuádruple valencia, es decir, a la capacidad de combinarse con hasta cuatro átomos a la vez. Existen otros dos elementos químicos con esa misma propiedad: el silicio y el germanio. El primero de ellos tiene más probabilidades de poder ser un sustituto del carbono, ya que es químicamente más similar a este y resulta aún más abundante en la corteza terrestre.

Las propiedades químicas del silicio parecen descartarlo como base para la vida en la Tierra, ya que no puede formar compuestos con la misma versatilidad que el carbono. Los silanos, compuestos de silicio similares a los hidrocarburos, tienden a descomponerse en agua, y el silicio suele presentarse en la forma de sílice (dióxido de silicio), que podemos ver en la arena de una playa o en un cristal de cuarzo.

Por otro lado, las condiciones en otros planetas pueden ser muy distintas a las terrestres. Los compuestos de silicio comple-

jos podrían existir en ambientes donde el agua haya sido sustituida por otro solvente como el metano, el amoníaco o el fluoruro de hidrógeno. Otros compuestos que consideramos letales para nuestra biología podrían formar lagos líquidos capaces de dar lugar a vida basada en otra sustancia, sea silicio, germanio u otro elemento. Caso de suceder, se trataría de una forma de vida muy distinta a la que conocemos, pero que actuaría de forma similar a lo que consideramos normal en un ser vivo: nacimiento, reproducción, proliferación, competición y muerte. En principio, lo único que la vida necesitaría es una fuente de energía, un sustrato líquido y una sustancia adecuada que sirviera como soporte para dar lugar a la complejidad.

Se puede ir incluso más allá y conjeturar la posible existencia de ambientes vivibles totalmente distintos que hoy no podemos ni sospechar y cuyas posibilidades rozan la ciencia ficción, pero debemos ceñirnos al universo de las pruebas. Las evidencias experimentales obtenidas hasta la fecha mantienen el binomio carbono-agua como la combinación más viable para obtener vida y, a despecho de otras posibilidades exóticas, debemos centrarnos en la localización del carbono y el agua líquida para la búsqueda de vida similar a la que se ha desarrollado en nuestro planeta.

Si algún día el ser humano quiere dar el salto a las estrellas, lo más lógico es que busque ambientes similares a los que dieron lugar a la vida en la Tierra. Por muy interesante que pueda resultar a los exobiólogos la evolución de la vida a -150°C bajo un mar de metano, difícilmente puede considerarse un lugar adecuado para colonizar. Puestos a escoger, la mejor opción sería un planeta similar al nuestro en temperatura, composición, atmósfera y masa, en el que pudiéramos fundar hogares y colonias.

¿Hay alguien ahí?

Podría ser que, en alguno de los planetas que hemos descubierto, existan otras civilizaciones. De hecho, llevamos décadas intentando establecer contacto con ellas sin ningún resultado hasta la fecha. Puede que sea debido a nuestra falta de habilidad, pero... ¿y si resulta que estamos solos en el vasto océano cósmico?

Sabemos que el ser humano dispone de cinco sentidos. Mientras que el gusto y el tacto funcionan mediante contacto directo, la transmisión del olfato es muy lenta, y el oído necesita un medio material de transmisión (en el vacío no se transmiten los sonidos). Así pues, solamente la vista es capaz de permitirnos una comunicación a larga distancia.

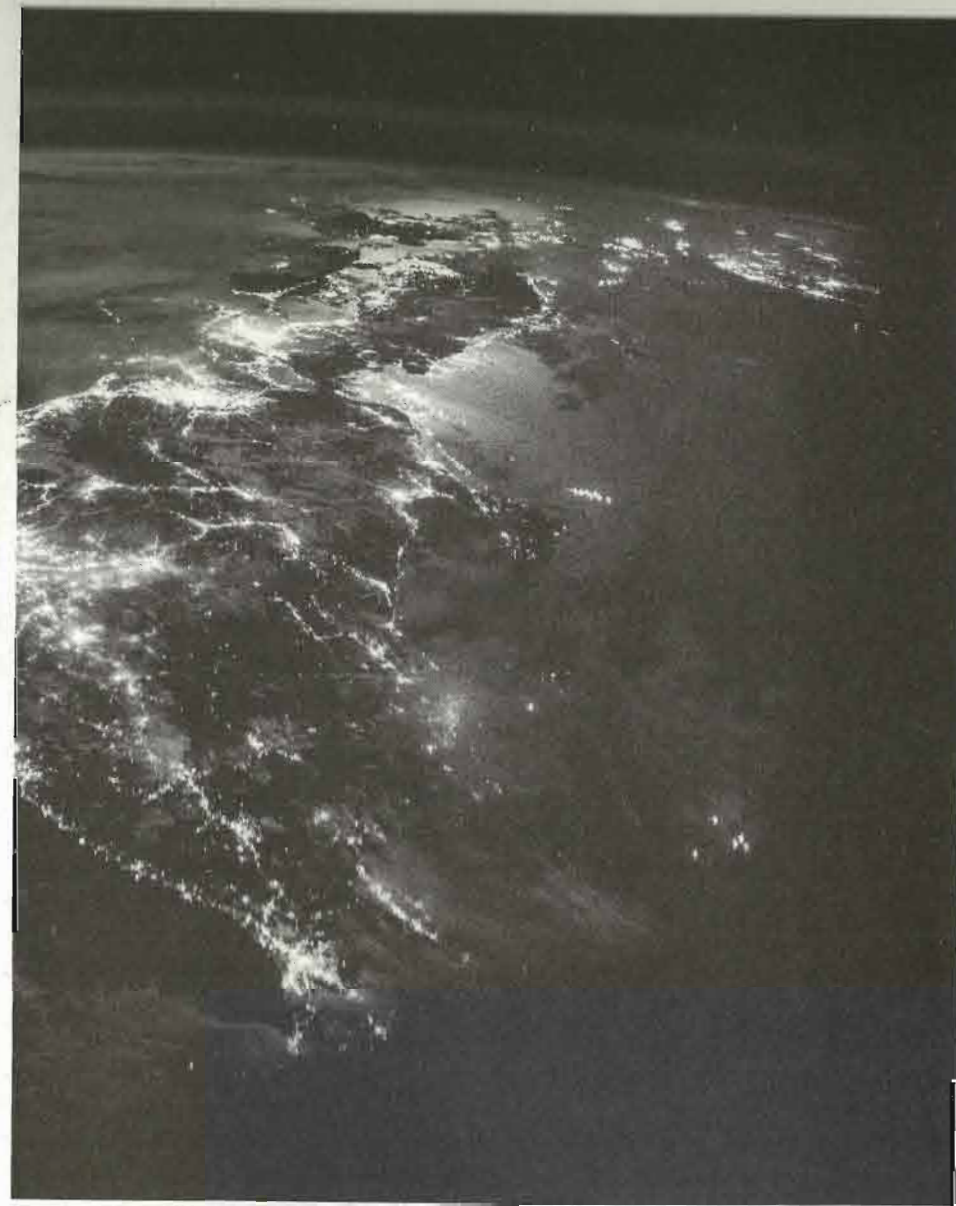
Por ese motivo, las primeras búsquedas de vida extraterrestre se hicieron utilizando la luz. A finales del siglo XIX los astrónomos consideraban seriamente la posibilidad de que el planeta Marte estuviese habitado, y la construcción de grandes telescopios hizo factible la exploración visual. Aunque estos primeros intentos resultaron infructuosos y dieron lugar a la fábula de los canales de Marte, marcaron el camino a seguir: usar la luz visible, una forma de observación ideal a grandes distancias. Incluso a simple vista, podemos ver estrellas tan lejanas que su luz tarda cientos de años en llegar hasta nosotros. Así que una hipotética civilización marciana podría detectar los patrones de luz y oscuridad de la zona nocturna de nuestro planeta (como se aprecia en la imagen de la pág. 139) e identificarlos como un subproducto de la actividad de seres inteligentes.

La situación cambia cuando consideramos la posibilidad de emitir mensajes de luz con destino a otras estrellas. ¿El problema fundamental? La competencia del Sol. Cada segundo, y de acuerdo con la famosa ecuación $E=mc^2$, los procesos de fusión termonuclear que se llevan a cabo en el núcleo de nuestra estrella convierten cuatro millones de toneladas de materia en energía pura, gran parte de ella en forma de luz. El ser humano no puede competir contra esta potencia luminosa mediante la fuerza bruta. Pero, afortunadamente, se trata de un problema que puede resolverse con maña. En lugar de emitir luz de forma indiscriminada, puede hacerse de tal manera que pueda ser identificada como luz artificial, no producida por procesos naturales. Así, cualquier civilización extraterrestre con conocimientos de física podría concluir que su origen solamente puede deberse a seres inteligentes.

Cuando una estrella emite en la banda de luz visible, no lo hace en todas las frecuencias (es decir, en todos los colores). La corona solar bloquea algunas de las frecuencias de emisión, produciendo lo que se llama un *espectro de absorción*, donde estrechas franjas negras en un mar de color indican la presencia de diversos elementos químicos. Cada elemento, como el hidrógeno, el helio o el carbono, produce su conjunto de franjas característico. Un astrofísico de otro mundo descubriría con facilidad las bandas de absorción de, por ejemplo, el hidrógeno.

Pero imaginemos que falta una de esas bandas oscuras, es decir, que está iluminada. No hay explicación natural para ello. La conclusión lógica sería que existen seres inteligentes alrededor de esa estrella intentando comunicarse mediante un haz de luz láser que emite en la frecuencia correspondiente a esa banda oscura.

Hasta finales de los setenta se creía que esta clase de fenómeno solamente podía crearse en un laboratorio, lo que delataría un origen inteligente; pero en 1995 el Observatorio Aerotransportado Kuiper de la NASA, montado en un avión de transporte C-41 modificado, detectó una emisión láser desde una estrella en la constelación del Cisne. Técnicamente es un máser (láser infrarrojo), pero fue la primera prueba de que los procesos que



Vista nocturna de Tokio y las ciudades del extrarradio. Esta es la imagen que presenta la Tierra desde el espacio en el espectro de luz visible. La fotografía fue tomada desde la Estación Espacial Internacional a 400 km de altitud.

DE LOS CANALES AL ROSTRO DE MARTE

Corría el año 1877 y el planeta Marte se encontraba en oposición —es decir, en una posición diametralmente opuesta a la del Sol visto desde la Tierra— a una distancia de nuestro planeta menor que en cualquier otro punto de su órbita. Aprovechando la ocasión, el astrónomo italiano Giovanni Schiaparelli (1835-1910) desarrolló una serie de observaciones astronómicas, gracias a las cuales realizó un planisferio en el que evidenció la existencia de una densa red de canales o raudales de origen natural. Cuando sus deducciones se tradujeron al inglés, se produjo un fallo de traducción: la expresión italiana *canali* se convirtió en la anglosajona *canal*, en lugar del término *channel*, más correcto porque implica un origen natural. Cuando el estadounidense Percival Lowell, descubridor de Plutón, continuó el trabajo de Schiaparelli, sus observaciones le hicieron concluir que una civilización marciana estaba realizando obras de ingeniería a escala gigantesca para llevar agua desde los casquetes polares marcianos. La famosa obra de H.G. Wells *La guerra de los mundos* se inspiró en esta idea. Schiaparelli, Lowell y otros cayeron en el error de forzar la percepción de ciertos rasgos para crear patrones donde no los hay. ¿El «culpable»? Un fenómeno psicológico que recibe el nombre de «pareidolia», que nos hace percibir una imagen de forma errónea, como ver caras en nubes o descubrir el rostro de Jesucristo en las tostadas.



La fotografía grande y la inserta a la izquierda fueron tomadas por la sonda Viking 1, en 1976, en la región marciana de Cydonia. En ellas algunos han pretendido ver monumentos en forma de rostro humanoide erigidos por seres alienígenas. La imagen inserta a la derecha fue tomada por la Mars Global Surveyor en 2001, y en ella se revela que el monumento corresponde en realidad a una formación de origen natural. La imagen que la Mars Express, lanzada por la ESA (página contigua), realizó en 2006 despeja cualquier atisbo de duda.

Cuando queremos creer

En 1976 la historia se repitió *in situ*. Una de las imágenes enviadas desde Marte por la sonda Viking 1, cerca del límite de resolución, parecía mostrar un rostro gigantesco esculpido sobre la superficie del planeta rojo, como se refleja en la imagen. A lo largo de los años, diversos grupos de creyentes aceptaron la imagen del «rostro de Marte» como prueba de que la especie humana procede del planeta Marte, y llegaron a acusar a la NASA de fomentar una conspiración para ocultar la verdad. En el año 2000, la película *Misión a Marte*, dirigida por Brian de Palma, aprovechó este mito. Para entonces, sin embargo, nuevas imágenes de más alta resolución tomadas por la sonda Mars Global Surveyor de la NASA habían confirmado que el rostro de Marte no existía, salvo en la imaginación del observador. Otras fotografías tomadas por la sonda Mars Odyssey (NASA) y la Mars Express (ESA) se unieron al conjunto de pruebas en contra. Sorprendentemente, muchos grupos amantes de las teorías de la conspiración continúan sin dejarse convencer. Para ellos la imagen original es auténtica, y las demás (tomadas con alta resolución desde tres naves distintas) son falsas, fruto de un encubrimiento internacional a gran escala.



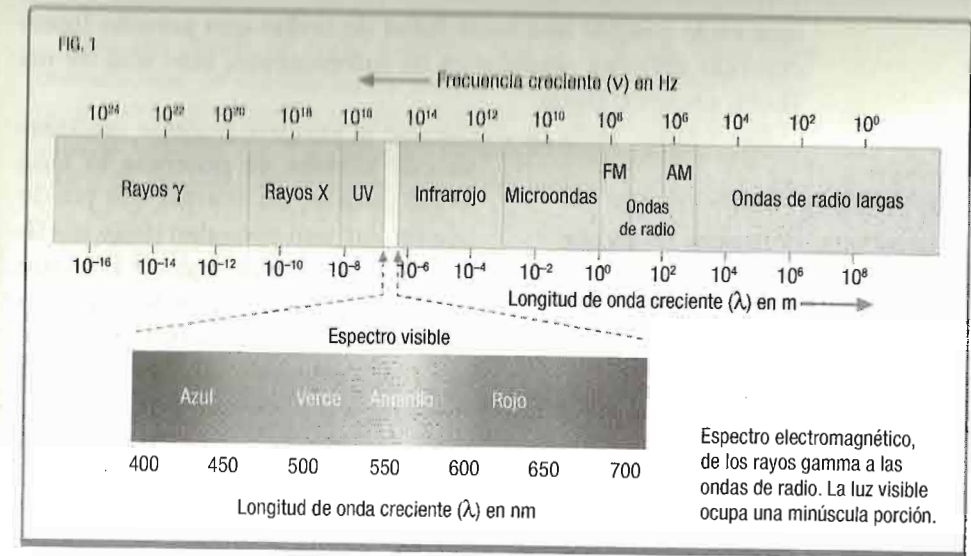
generan una luz láser pueden ocurrir de forma natural en el universo. En este caso no coincidió con una línea de absorción correspondiente a sustancia alguna conocida, de forma que no se cree que fuese una señal inteligente. Nadie intentaba llamar la atención de los astrofísicos de la Tierra emitiendo en una frecuencia de un espectro de absorción.

Una emisión láser es solamente un indicio poderoso de la existencia de una entidad inteligente, pero la probabilidad se convierte en certeza en el momento en que se analiza y se descubren señales, y es que el láser puede transmitir grandes cantidades de información. Las redes de alta velocidad que tapizan nuestras ciudades son cables de fibra óptica recorridos por láseres de baja potencia. Con la tecnología actual podemos transmitir el contenido entero de la Wikipedia a un vecino extrasolar en una fracción de segundo.

Las comunicaciones interestelares por láser son, en principio, factibles, pero tienen sus propios problemas. Uno de los más agudos es la atenuación. Las partículas de gas y polvo, aunque muy dispersas en el espacio interestelar, contribuirían a reducir la intensidad del haz de luz. Un ejemplo natural lo tenemos en nuestra propia galaxia: aunque podemos observar gran cantidad de estrellas, el centro galáctico permanece opaco a la luz visible debido a grandes nubes de gas que bloquean la luz.

Incluso en ausencia de atenuación, toda señal de luz disminuye de intensidad conforme se extiende por el espacio. Para que una señal pueda ser detectada al doble de distancia se necesita cuatro veces más potencia. Eso es común a todo tipo de señales visuales, incluyendo las de un láser. Queda claro que emitir un mensaje a una civilización en una estrella próxima requiere una gran cantidad de potencia.

Afortunadamente, disponemos de otras herramientas para transmitir y recibir señales. La luz visible es tan solo un subconjunto pequeño de las ondas electromagnéticas. Variando la energía de la onda podemos emitir en frecuencias no visibles: ultravioleta, rayos X y gamma en la región de altas energías; infrarrojos, microondas y ondas de radio en la de bajas energías (figura 1).



ONDAS DE RADIO PARA LA COMUNICACIÓN INTERESTELAR

Para que una determinada onda electromagnética sea útil en tareas de transmisión y recepción, debemos exigirle un conjunto de propiedades. En primer lugar, debe ser de una intensidad tal que no se confunda con la que generan ciertos fenómenos naturales. No tiene sentido usar, por ejemplo, la luz visible o infrarroja si nuestro Sol, o nuestra galaxia, la emiten en grandes cantidades. El propósito evidente es «gritar» en un tono de voz que sea distinto al ruido de fondo.

Igualmente importante es que esa onda sufra la menor atenuación posible a través de largas distancias, propiedad que depende de la densidad y naturaleza de los obstáculos interpuestos en el camino, así como de la frecuencia de la radiación utilizada. También es necesario que la tecnología permita una fácil transmisión y recepción. Los rayos gamma, por ejemplo, tienen una energía tan alta que su interacción con la materia suele ser violenta, lo que dificulta la construcción de instrumentos para su creación y emisión. Por supuesto, preferire-

mos en lo posible una modalidad de ondas que permita intercambiar grandes cantidades de información, más allá de un «hola, estamos aquí».

Los sabios admiten hoy que la vida es una incesante lucha por la existencia, y parece ser que también es esa la creencia de los espíritus de Marte.

De LA GUERRA DE LOS MUNDOS, DE H.G. WELLS

Por último, sería deseable que la emisión pudiese realizarse con niveles de potencia lo más bajos posible. La energía que puede manipular una sociedad tiene sus límites, y aunque la especie humana pudiese concentrar toda su potencia en un programa de emisión de señales electromagnéticas con fines de comunicación, también tiene otras necesidades que atender, como el

transporte, la alimentación o la lucha contra la pobreza.

Las comunicaciones en nuestro propio planeta siguen muchos de estos requisitos. Los teléfonos móviles emiten y reciben en el rango de las microondas, un tipo de ondas de radio de alta frecuencia. El Sol emite relativamente poco en ese rango, lo que permite el envío de grandes cantidades de información por el aire y, aunque la recepción de la señal depende de las condiciones atmosféricas, en general es bastante buena.

Entonces... ¿qué tipo de onda electromagnética es la ideal frente a todos los requisitos impuestos? Podemos escoger entre unas cuantas alternativas, pero la mejor es la más sencilla: las ondas de radio. Descubiertas en 1888 por el físico alemán Heinrich Hertz (1857-1894), se trata de ondas electromagnéticas con una frecuencia millones de veces menor que la de la luz visible. Las ondas de radio, por su baja energía, son fáciles de producir y también de recibir. Pueden penetrar en los objetos materiales y atravesar la materia de forma mucho más eficiente que la luz visible. Los submarinos portadores de misiles balísticos intercontinentales, por ejemplo, suelen comunicarse mediante ondas de radio de muy baja frecuencia y gran poder de penetración. Todas esas características convirtieron las ondas de radio en el vehículo ideal de comunicación y actualmente se utilizan de forma masiva para programas de radio (AM, FM, onda corta, microondas) y para detección mediante radar.

Pero las ondas de radio también son el vehículo ideal para comunicarse en el espacio. No en vano son usadas de forma rutinaria para controlar las naves espaciales y recibir sus datos. Las sondas Voyager 1 y 2 continúan enviando información hoy día, cerca de cuarenta años después de ser lanzadas. La potencia con que emiten es inferior a la de una bombilla de frigorífico y sus mensajes han de recorrer distancias superiores a los quince mil millones de kilómetros (más que el diámetro del sistema solar). A pesar de ello, las antenas de la Red de Espacio Profundo de la NASA —tres complejos de antenas ubicados en Camberra (Australia), en la capital de España, Madrid, y en Goldstone (Estados Unidos)— pueden captarlas.

Sin duda, si deseáramos comunicarnos con una civilización extrasolar, la forma más lógica sería usar ondas de radio. Los requisitos técnicos y de energía son sencillos y la tecnología actual nos permite enviar un pulso de radio al otro extremo de la galaxia con potencia suficiente para que pueda ser captado por encima del ruido de fondo producido por los fenómenos naturales.

UN POZO DE AGUA RADIOASTRONÓMICO

Para emitir un mensaje a distancias interestelares hay que tener en cuenta algunos detalles. El primero es el destino. Las estaciones de radio terrestres suelen ser del tipo omnidireccional, es decir, emiten en todas las direcciones. Esto no es posible en una emisión interestelar, ya que los requisitos de energía serían prohibitivos. En su lugar es preciso escoger los destinos de nuestras transmisiones de acuerdo a criterios que maximicen la probabilidad de recepción. Puede tratarse de las estrellas más cercanas, o de tipo similar a nuestro Sol, o bien las que tengan planetas ya detectados.

A continuación hay que escoger la frecuencia. El dial de una radio AM o FM permite sintonizar diversas emisoras, para lo cual el receptor se centra en una frecuencia de emisión e ignora las demás. De modo similar, escuchar señales de radio precisa de alguna forma de sintonizar la frecuencia adecuada. ¿Pero cuál

es esa frecuencia? No lo sabemos, nadie nos ha dado una lista de emisoras. Hemos de pensar como un alienígena.

Cuando se inició la búsqueda para encontrar señales extra-terrestres, algunos científicos propusieron escoger la banda de frecuencias correspondiente a ondas de radio con longitud de onda de 21 cm. Esa es la frecuencia a la que emiten los átomos de hidrógeno cuando efectúan un proceso llamado transición hiperfina, cuyo resultado es la emisión de radiación con una longitud de onda de 21,106 cm (correspondiente a una frecuencia de 1420,41 MHz). Otra frecuencia de interés es la de longitud de onda de 18 cm (1600 MHz), correspondiente a la emisión hecha por moléculas de OH. Ambas se encuentran en la región de las ondas de radio conocidas como microondas, donde el ruido de fondo debido a las emisiones naturales es muy bajo.

Los proyectos dedicados a la búsqueda de inteligencia extra-terrestre o SETI (*Search for Extraterrestrial Intelligence*) se han centrado hasta ahora en la banda de frecuencias de microondas entre 18 y 21 cm, es decir, entre las emisiones de dos constituyentes del agua (H y OH), lo que hizo que los radioastrónomos bautizaran esa región del espectro electromagnético como *pozo de agua*. Si una civilización explorase el universo utilizando frecuencias de radio, como hacemos nosotros, tendría necesariamente que fijarse en las emisiones en esa banda para sus propios estudios de radioastronomía; comenzar allí la búsqueda de señales no naturales parecería un paso lógico y natural.

Puesto que no sabemos cuál es la frecuencia exacta a la que una hipotética civilización extraterrestre podría estar emitiendo, hemos de explorarlas todas. Al igual que una radio que sintoniza FM va barriando las posibles emisoras, una banda de frecuencias como la del pozo de agua puede subdividirse en múltiples canales centrados en una frecuencia determinada. Así, la banda de este «pozo radioastronómico» puede contener millones de canales y rastrearlos sería una tarea agotadora si se hiciese a mano. Afortunadamente puede realizarse automáticamente: algunos de los proyectos SETI más ambiciosos (BETA, Phoenix, ATA) son capaces de examinar hasta mil millones de canales.

LINCOS, EL LENGUAJE CÓSMICO

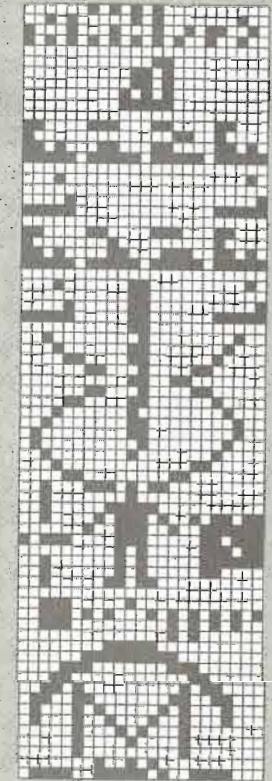
Si hay un lenguaje que los humanos y los extraterrestres podrían tener en común es el de las matemáticas: en cualquier lugar del universo uno más uno suman dos. Basándose en esa creencia, el matemático holandés Hans Freudenthal (1905-1990) desarrolló en 1960 un lenguaje matemático para comunicarse con formas de vida extraterrestre llamado LINCOS (Lingua COSmica). Partiendo de una serie de símbolos (que aquí denotaremos como A, B, C...; véase la tabla), Freudenthal fue construyendo una estructura matemática tras otra. Los diez primeros símbolos, de la A a la J, representan los dígitos del 1 al 10; los siguientes corresponden a las operaciones básicas y otros signos matemáticos como desigualdad, aproximación, paréntesis, potencias, raíces, factoriales y series infinitas. Definidos los conceptos matemáticos básicos, el vocabulario se extiende para englobar términos físicos y lógicos, de tal forma que permiten iniciar una conversación en la que se puedan formular preguntas y devolver respuestas.

Sumar es más fácil que conversar

Freudenthal es conocido por sus contribuciones en campos como el álgebra y la educación matemática, pero falleció sin ver cómo LINCOS se utilizaba en la práctica, y lo cierto es que nunca terminó de desarrollar ese mensaje. Se trata de una tarea muy compleja: sumar es sencillo, pero conversar es complicado. Otro intento de establecer comunicación con el «más allá» galáctico fue llevado a cabo en 1974. Fue el denominado mensaje de Arecibo (véase la imagen) escrito en código binario desde el radiotelescopio de Arecibo, en Puerto Rico, y fue escrito, entre otros, por los astrónomos Frank Drake y Carl Sagan.

LINCOS	Símbolo	Significado
AKALB	K(+), L(=)	$1 + 1 = 2$
CMALB	M(-)	$3 - 1 = 2$
DKNLD	N(0)	$4 + 0 = 4$
JLAN	BASE 10	$10 = 10$
BOCLF	O(x)	$2 \times 3 = 6$
FPCLB	P(÷)	$6 \div 3 = 2$
APJLQJ	Q(1/)	$1 \div 10 = 1/10$
QJLRA	R(.)	$1/10 = 0,1$

Selección del vocabulario de LINCOS.



Mensaje de Arecibo, escrito mediante código binario (sin relación con LINCOS). Fue transmitido al cúmulo globular M13 en el año 1974.

¿Pero cómo saber cuál es el canal que tenemos que «escuchar»? ¿Cómo distinguir una señal de origen inteligente de una señal producida por causas naturales? La clave consiste en la regularidad. Una señal enviada deliberadamente no constará de música o voz, rasgos típicamente humanos, sino que contendrá patrones regulares imposibles de duplicar por procesos naturales. Una forma sencilla consistiría en enviar un pulso de duración determinada, luego dos pulsos, luego tres, cinco, siete, once, trece... la lista de números primos, números naturales divisibles solamente por sí mismos y por la unidad. Una transmisión de esas características solo puede atribuirse a seres inteligentes conocedores de las matemáticas.

Es posible que existan otras posibilidades más exóticas de enviar mensajes al universo. Podríamos usar neutrinos, un tipo de partículas que viaja casi a la velocidad de la luz. El poder de penetración de estas partículas en la materia las hace prácticamente insensibles a todo tipo de atenuación por polvo o gas. Desafortunadamente, esa misma propiedad las hace extraordinariamente difíciles de detectar y, aunque sabemos cómo producirlas, no tenemos forma de manipularlas para enviar información.

¿DÓNDE SE ENCUENTRAN NUESTROS VECINOS?

Una civilización deseosa de contactar con sus vecinos puede establecer campañas de emisión en diversas frecuencias de radio y, al mismo tiempo, usar sus radiotelescopios para recibir mensajes de otros. Nosotros somos una de estas civilizaciones. En diversas ocasiones hemos enviado mensajes a otros soles de forma deliberada, si bien los esfuerzos han sido esporádicos. También estamos intentando escuchar señales de otros, de momento sin éxito, lo que ha planteado una cuestión conocida como «la paradoja de Fermi», que define la contradicción que hay entre las estimaciones que afirman que hay una alta probabilidad de que exista vida inteligente en otros planetas y la ausencia total de evidencias al respecto.

Lo cierto es que, por el momento, no se conoce razón por la cual la vida no pueda desarrollarse en otros mundos y, además, las observaciones han demostrado la existencia de miles de exoplanetas en las estrellas analizadas hasta ahora. Una extrapolación a toda nuestra galaxia arroja cifras de miles de millones de planetas y, aunque solo un pequeño porcentaje de ellos tenga condiciones de habitabilidad, estaríamos hablando de millones de posibles planetas habitables. La proporción de mundos en los que se haya desarrollado vida inteligente puede ser muy pequeña, pero de nuevo estaríamos hablando de una gran cantidad en términos absolutos. La gran pregunta, por tanto es: si nuestra galaxia tiene tantas civilizaciones extraterrestres, ¿dónde están? ¿Por qué no nos llaman?

Tal vez no usen las ondas de radio para comunicarse con otras estrellas. O quizá no hagan esfuerzos de transmisión deliberados hacia otros mundos. Aun así, podríamos detectar lo que ellos mismos emiten para su propio mundo. En este momento, la Tierra es un fuerte emisor de ondas de radio y microondas. Las transmisiones de radio y televisión que realizamos para nuestro propio entretenimiento acaban dispersándose por el espacio, así como los haces de microondas de nuestras comunicaciones terrestres. Los radares civiles y militares emiten poderosos pulsos de ondas de forma regular, y un observador extraterrestre podría deducir el periodo de rotación de la Tierra analizando la periodicidad de esas señales.

Pero ¿y si los extraterrestres consideran la radio como una tecnología desfasada? Hace algo más de cien años los seres humanos comenzaron las primeras transmisiones de radio y en la actualidad usamos las frecuencias de radio y microondas de forma masiva, pero estamos en proceso de cambio a favor de otras formas de transmisión como el cable y la fibra óptica. Puede que dentro de otro siglo hayamos jubilado la tecnología de radio por completo y que la Tierra pase a ser silenciosa en esas frecuencias. En tal caso, las civilizaciones tendrían una «ventana» de un par de siglos durante los cuales podrían detectar señales de radio: antes sería demasiado pronto por que no las habrán descubierto. Pero si sucede demasiado tarde, ya las habrán dejado de usar.

Existen otras posibles soluciones a la paradoja de Fermi. En lo referente a los problemas de comunicación, en primer lugar es posible que lo estemos haciendo mal. Quizá nuestras tácticas de escucha sean incorrectas porque estamos centrándonos en las frecuencias equivocadas, o puede que ya estemos recibiendo señales inteligentes pero somos incapaces de reconocerlas o

de decodificarlas. También podría ser que la «ventana» de observación en frecuencias de radio sea demasiado breve, bien porque los extraterrestres decidan abandonar esa tecnología rápidamente, bien porque su civilización se autodestruya.

Dicen que cuando logras cultivar en algún lugar está oficialmente colonizado. Así que técnicamente colonicé Marte. Toma eso, Neil Armstrong.

DE EL MARCIANO, DE ANDY WEIR

Asimismo, es posible que las civilizaciones se hayan desarrollado solo

en épocas recientes y que nosotros seamos de los primeros en nuestra región de la galaxia. A fin de cuentas, una cosa es la aparición de vida, fenómeno que consideramos probable casi hasta el punto de lo inevitable, y otra muy distinta es el desarrollo de seres inteligentes, lo cual requiere cientos de millones de años de evolución en un ambiente estable y relativamente benigno.

Lo cierto es que el universo es un lugar peligroso para vivir, plagado de estallidos de rayos gamma, supernovas y pulsares. La formación de nuestro sistema solar ha pasado por fases de fuerte bombardeo de objetos, y la estabilidad del clima en nuestro mundo depende de factores como la tectónica de placas, la presencia de los demás planetas y la propia existencia de la Luna. ¿Es posible que nosotros hayamos tenido suerte mientras las demás civilizaciones extraterrestres siguen el camino de los dinosaurios hacia la extinción?

Quizá haya algún paso en el proceso de formación de planetas, vida y posterior inteligencia que sea más raro de lo que creemos y que se nos escape. Puede que se trate del paso de vida unicelular a organismos multicelulares, puede que sea el paso que lleva a la inteligencia. En cuanto a la conversión de inteligencia en desarrollo tecnológico, ¿quién asegura que ese paso sea natural? La mayoría de las culturas humanas antiguas tenían amplios co-

nocimientos del mundo natural y lo aplicaban de forma empírica en su sociedad (farmacopea, metalurgia, geometría), pero muy pocas desarrollaron la ciencia como cuerpo de conocimiento, y aún menos la usaron para el desarrollo tecnológico. No fue hasta el Renacimiento cuando comenzó la evolución que condujo hasta la ciencia y la tecnología tal como hoy la conocemos, y eso a pesar de que la civilización humana data de miles de años atrás.

Si los problemas de comunicación son de índole técnica, cabe esperar que los resolvamos antes o después. La búsqueda en el pozo de agua puede extenderse a otras bandas de radio y microondas, así como al resto del espectro electromagnético, y podemos desarrollar algoritmos de reconocimiento de pautas cada vez más sofisticados; después daremos el salto a los neutrinos, las ondas gravitacionales, los gravitones y otras formas de comunicación que hoy no podemos ni imaginar.

Si, por el contrario, resulta que somos la única civilización inteligente existente en nuestro entorno estelar, el siguiente paso lógico será pensar en extendernos a los mundos vecinos. Sin competencia para colonizarlos, podemos hacer nuestros planes de expansión con total tranquilidad. Puede que, si en el futuro próximo conseguimos resolver los problemas del viaje superlumínico, tardemos solo unos años o puede que acabemos recurriendo a grandes naves que afronten viajes de siglos. Sea como sea, en algún momento, de algún modo, la humanidad saltará a las estrellas.

VISLUMBRANDO EL PORVENIR

Lo que suceda después es algo que no podemos más que conjeturar. La especie humana se ha caracterizado por la colonización de nuevos territorios, y también por la competencia entre los diversos grupos. Podemos vislumbrar un futuro en el que los males y las miserias del hombre se trasladen al cosmos, con imperios que surgen y decaen, guerras interestelares interminables, sociedades esclavistas, hambrunas, agotamiento de recursos, los viejos pecados en un nuevo escenario. En un entorno alternativo

más optimista, el proceso para la humanización del hombre continuará, con el objetivo final de una sociedad que haya dejado atrás sus desavenencias y avance unida hacia el porvenir.

Cualquiera que sea nuestro futuro fuera de la Tierra, se hace cada vez más claro que en nuestro propio planeta el futuro es incierto. La gestión que hemos hecho de unos recursos limitados es, hasta la fecha, bastante penosa. Incluso en el caso de que nos convirtamos en mejores gestores y limpiemos bien nuestra casa (tanto literal como figuradamente), la Tierra continuará siendo un barco a merced de los elementos. En las últimas décadas se han comenzado a evaluar las principales amenazas externas a nuestro planeta. Una de ellas es una colisión con un asteroide o cometa.

En 1994 los astrónomos observaron cómo el cometa Shoemaker-Levy 9 se rompía en una veintena de fragmentos que cayeron en la atmósfera de Júpiter. Desde entonces se han rastreado casi trece mil objetos en las cercanías de la órbita terrestre. Se les conoce como NEO (*Near Earth Objects*, «objetos cercanos a la Tierra»), y casi un millar de ellos tienen un tamaño superior a un kilómetro. La detección de objetos NEO ni siquiera está completa, y aunque la probabilidad de una colisión con alguno de ellos es muy pequeña los daños podrían ser catastróficos.

Hay precedentes. En el año 1908 un núcleo de cometa de unos cien metros de diámetro explotó sobre la región siberiana de Tunguska, una zona afortunadamente poco habitada, liberando una energía similar a la de un arma termonuclear de gran potencia. Más recientemente, un bólido con un tamaño estimado de unos 20 metros atravesó el cielo sobre la región de Chelyabinsk en 2013 y también explotó en el aire. Los heridos se contaron por centenares. Hasta la fecha hemos tenido suerte, pero no debemos tentarla eternamente.

Podemos mejorar nuestra protección frente a cometas y asteroides para detectarlos y desviarlos antes de que supongan un riesgo para nosotros, pero su impacto no es la única amenaza potencial procedente del espacio. Una explosión de supernova o un estallido de rayos gamma cercano puede provocar la desaparición de la capa de ozono y la destrucción de los ecosistemas terrestres. Una erupción masiva procedente del Sol provocaría

una tormenta de partículas capaz de eliminar los dispositivos electrónicos de los que dependemos para la supervivencia de nuestra civilización.

Resistir fuerzas de esa magnitud está más allá de la capacidad humana. Sin embargo, las probabilidades de sobrevivir como especie aumentan si dejamos de estar anclados a un solo mundo. El físico soviético Konstantin Tsiolkovski (1857-1935) dijo en cierta ocasión que la Tierra es la cuna de la humanidad pero que no se puede vivir siempre en la cuna. La posibilidad de viajar y colonizar mundos más allá de nuestro sistema solar será una tarea ardua y larga, pero también es la mejor póliza de seguros para el futuro de la especie humana.

Hasta hace relativamente poco no teníamos la menor garantía de que existiesen mundos en otras estrellas a los que viajar. Hoy sabemos que existen, conocemos cada vez más sobre ellos. Algún día, cuando decidamos dar el salto a las estrellas, sabremos qué dirección tomar. No será una búsqueda a ciegas.

- ASIMOV, I., *Civilizaciones extraterrestres*, Barcelona, Bruguera, 1981.
- FREUDENTHAL, H., *LINCOS: Design of a Language for Cosmic Intercourse*, Ámsterdam, North Holland Publishing Company, 1960.
- GIMÉNEZ, Á., *Exoplanetas*, Madrid, CSIC/Los Libros de la Catarata, 2012.
- LUQUE, B., BALLESTEROS, F. ET AL., *Astrobiología. Un puente entre el Big Bang y la vida*, Madrid, Ediciones Akal, 2009.
- MAYOR, M., FREI, P.Y., *Los nuevos mundos del cosmos. En busca de exoplanetas*, Madrid, Ediciones Akal, 2006.
- O'NEILL, G.K., *Ciudades del espacio*, Barcelona, Bruguera, 1981.
- SAGAN, C., *Cosmos*, Barcelona, Planeta, 2004.
- : *La conexión cósmica*, Barcelona, Plaza & Janés, 1990.
- TAYLOR, S.R., *Nuestro sistema solar y su lugar en el cosmos*, Madrid, Ediciones Akal, 2003.
- TYSON, N.D.G., *The Pluto Files: The Rise and Fall of America's Favorite Planet*, Nueva York, W.W. Norton & Company, 2009.

2M1207 83
51 Eridani 84
51 Pegasi 57, 60, 101, 103

acoplamiento de marea 40, 41, 117
Adams, John 17
Alfa Centauri 106, 107
Alfa Piscis Austrini 83
anillo de Einstein 74
años-luz 33, 51, 56-58, 66, 70, 78, 79,
83-85, 90, 92, 93, 97, 105, 106
astrobiología 11, 114

Bessel, Friederich 88
Beta Pictoris 84, 85
biofirma 122-125
Biosphere 2 126, 127
Bruno, Giordano 7, 8, 11, 105
Burnell, Jocelyn Bell 93, 94

CHEOPS 70
CODEX 62
Copérnico, Nicolás 8, 17, 19
coronógrafo 82-84, 86
Corot 58, 68
Corot-1 68

Corot-3 68
Corot-7 68
Cruz de Einstein 75-77

disco protoplanetario 34, 35, 38, 46,
83-85, 100-102
Disney, Walt 15, 18

efecto Doppler 50, 52, 53, 55, 56
Einstein, Albert 38, 74, 78
ELODIE 57, 60
enana marrón 25, 27, 56, 68, 83, 84, 97
Encélado 120
ESPRESSO, espectroscopio 62
estrella
 de Barnard 90
 de neutrones 42, 91-93
Europa 41, 58, 120, 121
exobiología 123, 125, 133
exoplanetas 10-12, 25, 47, 54, 56, 60, 62,
64, 69-71, 76, 79, 80, 84, 86, 91, 92,
97-102, 104, 107, 108, 110, 111, 120,
149
extremófilo 115
Fomalhaut 83-85

Freudenthal, Hans 147
fuerzas de marea 37, 39-41, 100

G2237 + 0305 75, 77
Galilei, Galileo 8, 17, 40, 58, 73
galileanos, satélites 8, 17
gigante gaseoso 10, 26, 27, 57, 68, 84,
90, 102, 105, 107, 109
Gliese 436 103, 104
Gliese 581 61, 106
Gliese 1214 67

habitabilidad 43, 104, 113, 116, 117,
120-123, 149
hábitat artificial 126
HARPS 61
HD 114762 10, 56, 57, 94
HD 176051 90
HD 209458 66
Herschel, William 17, 20
Hertz, Heinrich 144
Hewish, Antony 93
Hiparcos 91
Hubble, telescopio espacial 69, 81
HW Virginis 94

Júpiter 8, 10, 15, 17, 20, 21, 25-27, 37,
38, 40, 41, 50-52, 56, 57, 60, 62, 64-
69, 74, 78, 80, 82, 84, 86, 90, 97, 100-
104, 107-110, 120-122, 152

Kepler 58, 68-70, 91, 98, 99, 109, 120
Kepler-16 109
Kepler-34 109
Kepler-62 120
Kepler-138 61
Kepler-186 118, 122
Kepler-442 122
Kepler-452 118, 119, 121, 122
Kepler-453 109
KMT-2105-1 79
Kuiper, cinturón de 16, 22, 27, 41

Latham, David 56
Le Verrier, Urban 17
lente gravitacional 74-79
LGM-1 93
límite de Roche 40
LINCOS 147

Lowell, Percival 15, 40, 140

Mayer, Johann 58
Mayor, Michel 57, 60
MEarth 66, 67
método
de astrometría 87, 88, 90
de cronometraje 91, 92, 94, 108
de observación directa 71, 80, 81,
83, 84, 86-88, 108
de tránsitos 64-66, 68-70, 76, 80, 90,
108
de velocidad radial 50, 53, 54, 57,
60-62, 64, 66, 71, 90, 100, 108
microlente gravitacional 76, 78-80, 87,
107, 108
microondas 63, 142-144, 146, 149, 151
migración 57, 100
minineptuno 104, 105, 110, 122
Mu Arae 51, 58, 59

Neptuno 9, 15, 17, 20, 22, 37, 38, 41, 49,
74, 97, 102-105, 110, 122
neutrino 148, 151
New Horizons 21, 22
Newton, Isaac 73

OGLE 75, 76, 78, 79
OGLE-2005-BLG-006 78
OGLE-2009-BLG-151 MOA-2009-232 79
OGLE235-MOA53 79
Ojo de Saurón 85
ondas
de radio 63, 81, 93, 142-146, 149
milimétricas 125

Paczynski, Bohdan 74-76
paradoja de Fermi 148, 150
paralaje 88, 89
Paranal 83
pareidolia 140
pársec 51
Piazzi, Giuseppe 20
planeta
enano 18, 22, 23
Tatooine 109
tipo Júpiter 101
tipo Neptuno 103, 104
planetesimal 34

PLATO 70
plutoide 24
Plutón 8, 13, 15, 16, 18, 20-24, 27, 41, 49,
97, 140
plutonear 16
pozo de agua 145, 146, 151
problema de los N-cuerpos 41
Proción (Alfa Canis Minoris) 58, 88
Próxima Centauri 106
PSR B1257+12 92, 104, 105
púlsar 24, 27, 91-93, 104, 105, 117, 150
quásar 74-77
Queloz, Didier 57, 60

rayos X 81, 142, 143
resonancia 41
Riotinto 115
rostro de Marte 140, 141

Sagan, Carl 58, 130, 147
Saturno 15, 17, 37, 40, 41, 57, 100, 102,
107, 120
Sedna 22
SETI 11, 146
Schiaparelli, Giovanni 140
silanos 132
Sirio (Alfa Canis Majoris) 28, 58, 88
SOPHIE 60
Stewart, Jon 16
Struve, Otto 52, 56, 61
subenana
B 92, 94
marrón 26, 27, 29
supernova 17, 33, 42, 43, 105, 150,
152

superterrra 104, 105, 110, 130, 122
SWEEPS-04 69
SWEEPS-11 69

terraformación 125, 128-130
TESS 70
Titán 120
Tombaugh, Clyde 15, 17, 18
transneptuniano, objeto 9, 20, 22-24,
27, 97
Tsiolkovski, Konstantin 153
Tyson, Neil deGrasse 16, 25, 27, 43,
117

unidad astronómica 51
Unión Astronómica Internacional 18,
19, 27, 56, 58
upsilon Andromedae 60
Urano 9, 15, 17, 20, 37, 40, 104
Urbano VIII 8

V391 Pegasi 94
VB 10 90
VLT 62, 83
Vogel, Carl Hermann 50, 52
Voyager 49, 145

WASP 67
WASP-19 67
Wien, Wilhelm 28
ley de 28, 82
WISE 1828+2650 26
Wolszczan, Alexander 92

zona Goldilocks 116, 117, 118, 120, 122
ZZ Ceti 92

Los exoplanetas

Durante siglos la humanidad ha conocido un solo sistema solar, el suyo propio, y la Tierra era el único de los planetas que albergaba vida. La existencia de mundos orbitando otros soles era una posibilidad que la ciencia admitía en teoría, pero solo desde los últimos años del pasado siglo los avances tecnológicos han permitido detectarlos. En la actualidad el número de exoplanetas confirmados supera los dos millares. El siguiente reto: hallar una nueva Tierra.

Arturo Quirantes es profesor de física en la Universidad de Granada.